

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR  
MYLÈNE VALLÉE**

**VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES RÉGIMES D'ÉROSION  
HYDRIQUE DANS NEUF BASSINS VERSANTS EN MILIEU AGRICOLE**

**SEPTEMBRE 2009**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

*Tout comme les rivières changent leur cours,  
l'idéal des hommes est aussi sujet à transformations.*

*Paulo Coelho*

## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche fut pour moi une aventure remplie d'épisodes passionnés et de moments de plaisirs simples, notamment sur le terrain, les deux pieds dans l'eau. Ce projet m'a également mis à l'épreuve et m'a fait vivre des périodes d'incertitudes et de découragement. C'est lors de ces moments que la présence de mes proches fut la plus précieuse. Parmi ces personnes, je remercie ma sœur Myriam et ma mère Martine pour leur écoute et leur soutien unique. Merci François, toi devant qui je peux être simplement moi-même. Merci pour ta présence.

Je remercie mon directeur de recherche, Stéphane Campeau, qui m'a permis d'évoluer dans ce projet avec beaucoup d'autonomie, et mon codirecteur Marc Duchemin de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement pour ses judicieux conseils. Merci également à Marie-Andrée Fallu, Martine Grenier, Maxime Brien et Yann Boissonneault pour leur aide.

Enfin, je souhaite souligner le soutien financier des organismes suivant : le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies, la Fondation du Centre d'études universitaires de Trois-Rivières, le Syndicat des professeurs et professeures de l'Université du Québec à Trois-Rivières et la Fédération de l'Union des Producteurs Agricoles de la Mauricie.

## RÉSUMÉ

L'érosion hydrique en milieu agricole constitue un problème environnemental de plus en plus préoccupant pour la société québécoise. En ce sens, depuis les dernières années, les efforts entrepris pour diminuer l'impact de l'agriculture sur la qualité des cours d'eau se sont intensifiés. Ces efforts se traduisent par l'émergence de plusieurs projets de restauration de cours dans les zones agricoles du Québec. Afin d'améliorer la gestion de nos cours d'eau, il est important d'approfondir nos connaissances sur les régimes d'érosion. Dans le cadre du projet de restauration du bassin versant de la rivière des Envies, notre étude s'est intéressée à deux problématiques particulières. Dans un premier temps, notre étude visait à déterminer les facteurs qui influencent les régimes d'érosion des bassins versants, et ce pour différentes saisons. Deuxièmement, nous avons pour fin, d'établir des objectifs de restauration pour la zone d'étude. Afin de répondre à nos objectifs, un suivi des débits et des concentrations de sédiments en suspension fut réalisé sur neuf petits bassins versants de la rivière des Envies. Pour analyser les régimes d'érosion des tronçons de cours d'eau moins dégradés et ainsi déterminer des objectifs de restauration, quatre des neuf stations ont été localisées dans des zones où l'agriculture est moins intensive. Une caractérisation des facteurs physiques et anthropiques fut réalisée sur tous les bassins versants à l'étude. Pour mesurer la variabilité spatio-temporelle des régimes d'érosion, des *sediment rating curves* (SRC) furent produites. Des matrices de corrélation et des régressions multiples entre les caractéristiques des bassins versants et les pentes des SRC ont été réalisées pour déterminer les facteurs qui influencent les régimes d'érosion. Les résultats obtenus indiquent que pour les bassins versants agricoles, 40 à 75 % des charges sédimentaires annuelles sont produites durant les périodes de fonte. Pour ces conditions, les facteurs qui influencent les régimes d'érosion sont reliés à la morphologie du cours d'eau, l'aire du bassin versant et l'occupation du territoire. Pour la période estivale et le début de l'automne, les facteurs qui influencent l'érosion sont reliés à la morphologie du cours d'eau, la granulométrie du lit en aval et l'écoulement. Les données recueillies aux stations agricoles, pour la période estivale, sont caractérisées par une médiane de  $7,8 \text{ mg L}^{-1}$ . Par l'analyse des données recueillies aux stations de référence au cours de l'été, une médiane de  $3,6 \text{ mg L}^{-1}$  est déterminée comme concentration de sédiments en suspension de référence, avec un intervalle de  $2,3 \text{ mg L}^{-1}$  (Q1) à  $7,3 \text{ mg L}^{-1}$  (Q3).

MOTS CLÉS : érosion, bassin versant, agriculture, *sediment rating curve*, variabilité saisonnière, facteurs d'érosion, objectif de restauration

## TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>iii</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS .....</b>	<b>xi</b>
 <b>CHAPITRE I      INTRODUCTION.....</b>	 <b>1</b>
1.1 Aspects théoriques.....	3
1.1.1 Formes d'érosion hydrique .....	3
1.1.2 Facteurs qui influencent l'érosion.....	4
1.1.3 Contribution respective des formes d'érosion.....	11
1.1.4 Variabilité saisonnière de l'érosion.....	12
1.1.5 Les objectifs de restauration.....	13
1.1.6 Les régimes d'érosion et les <i>sediment rating curves</i> .....	15
1.2 Objectifs de l'étude .....	16
 <b>CHAPITRE II      MATÉRIEL ET MÉTHODES .....</b>	 <b>18</b>
2.1 Aire d'étude .....	18
2.2 Suivi des débits et des concentrations de sédiments en suspension.....	21
2.3 Caractérisation des bassins versants et des cours d'eau .....	26
2.3.1 Facteurs physiques .....	26

2.3.2 Facteurs anthropiques.....	27
2.4 Analyses statistiques .....	30
<b>CHAPITRE III RÉSULTATS.....</b>	<b>32</b>
3.1 Caractéristiques des bassins versants .....	32
3.2 Variabilité saisonnière des débits et des régimes d'érosion .....	36
3.3 Facteurs qui influencent les régimes d'érosion selon les saisons.....	43
3.3.1 Périodes de fontes .....	46
3.3.2 Période estivale et début de l'automne.....	47
3.3.3 Annuel .....	47
3.4 Objectifs de restauration .....	48
3.4.1. Variabilité des régimes d'érosion entre les bassins versants agricoles et les bassins versants de référence .....	49
3.4.2. Détermination des objectifs de restauration.....	52
<b>CHAPITRE IV DISCUSSION .....</b>	<b>54</b>
4.1 Variabilité saisonnière des débits et des régimes d'érosion .....	54
4.2 Les facteurs qui influencent les régimes d'érosion en périodes de fonte .....	56
4.2.1 Morphologie du cours d'eau .....	57
4.2.2 Hydrographie et physiographie .....	58
4.2.3 Utilisation du territoire.....	59
4.2.4 Le ravinement : un processus d'érosion qui prédomine en conditions de fonte ?.....	59

4.3 Les facteurs qui influencent les régimes d'érosion à l'été et au début de l'automne.....	60
4.3.1 Morphologie du cours d'eau .....	61
4.3.2 Granulométrie du lit du cours d'eau à l'embouchure.....	62
4.3.3 Drainage .....	63
4.4 Les facteurs qui influencent les régimes d'érosion à l'échelle annuelle.....	63
4.5. Les objectifs de restauration .....	64
<b>CHAPITRE V CONCLUSION.....</b>	<b>67</b>
<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>72</b>
<b>ANNEXE A CONTRIBUTION DU RAVINEMENT AUX PERTES TOTALES EN SÉDIMENT PAR L'ÉROSION HYDRIQUE .....</b>	<b>82</b>
<b>ANNEXE B MATRICE DE CORRÉLATION ENTRE LES VARIABLES INDÉPENDANTES .....</b>	<b>85</b>



## LISTE DES FIGURES

2.1	Confluence du sous bassin B2 (printemps 2006).....	18
2.2	Localisation des neuf sous bassins à l'étude dans le bassin versant de la rivière des Envies .....	20
3.1	<i>Sediment rating curves</i> des événements de fonte et autres périodes pour les stations agricoles P1 (A) et P2 (B) .....	40
3.2	<i>Sediment rating curves</i> des événements de fonte et autres périodes pour les stations agricoles B2 (A) et T1 (B) .....	41
3.3	<i>Sediment rating curves</i> des événements de fonte et autres périodes pour la station agricole T2 (A) et la station de référence B1 (B) .....	42
3.4	<i>Sediment rating curves</i> des neuf stations d'échantillonnage pour l'été et le début de l'automne.....	51
3.5	A. <i>Sediment rating curves</i> des stations de référence pour l'été et le début automne B. Distribution des concentrations de sédiments en suspension des stations de référence pour l'été et le début de l'automne.....	53

## LISTE DES TABLEAUX

2.1	Codification des bassins versants et des stations d'échantillonnage à l'étude.....	21
2.2	Nombre de campagnes d'échantillonnage pour chaque station d'échantillonnage.....	23
2.3	Comparaison entre les méthodes de calcul d'aire de la section mouillée.....	25
2.4	Description des facteurs physiques .....	28
2.5	Description des facteurs anthropiques .....	29
3.1	Caractéristiques physiques des bassins versants et des cours d'eau .....	34
3.2	Caractéristiques anthropiques des bassins versants et des cours d'eau.....	35
3.3	Débits moyens spécifiques, charges sédimentaires spécifiques et concentrations moyennes des sédiments en suspension des stations agricoles et de la station de référence B1 pour les événements de fonte, les autres périodes et pour l'année complète .....	38
3.4	Matrice de corrélation entre les variables physiques des bassins versants agricoles et les pentes des <i>sediment rating curves</i> pour les événements de fonte, les autres périodes et pour l'année complète (seuils de signification : $a = 0,01$ ; $b = 0,05$ ) .....	44
3.5	Matrice de corrélation entre les variables anthropiques des bassins versants agricoles et les pentes des <i>sediment rating curves</i> pour les événements de fonte, les autres périodes et pour l'année complète (seuils de signification : $a = 0,01$ ; $b = 0,05$ ).....	45
3.6	Coefficients des régressions multiples produites pour la pente des <i>sediment rating curves</i> en périodes de fonte, à l'été et à l'automne et pour l'année complète.....	48

3.7	Débits moyens spécifiques, charges sédimentaires spécifiques et concentrations moyennes des sédiments en suspension des stations agricoles et des stations de référence pour la période estivale et le début de l'automne 2006.....	50
-----	---	----

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

ANOVA	Analysis of variance
BAC	Best attainable condition
CPVQ	Conseil des Productions Végétales du Québec
CSS	Concentration de sédiments en suspension
FISRWG	Federal Interagency Stream Restoration Working Group
HC	Historical condition
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
LDC	Least disturbed condition
MDC	Minimally disturbed condition
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
SRC	<i>Sediment rating curve</i>
UPA	Union des Producteurs Agricoles
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

Dans la vallée du Saint-Laurent, la problématique de l'érosion hydrique en milieu agricole constitue un problème environnemental important et mérite une attention particulière. Les propriétés des sols et les quantités importantes de ruissellement font de cette région une zone à risque élevé d'érosion. La plus grande partie des sédiments transportés par le ruissellement est acheminée vers les cours d'eau lors de la fonte des neiges, entre février et avril (Agriculture Canada, 1982). L'érosion hydrique des terres agricoles cause des problèmes non seulement à l'échelle locale des exploitations agricoles, mais également à l'échelle des bassins versants. L'exportation de sédiments contaminés (azote, phosphore, pesticides, agents pathogènes), des terres agricoles par les cours d'eau, a des impacts de plus en plus importants sur l'intégrité des écosystèmes et la santé publique. Parmi ces impacts on retrouve l'enrichissement des cours d'eau en phosphore, favorisant l'eutrophisation, l'éclosion de fleurs d'eau de cyanobactéries ainsi que l'envasement des frayères de poissons. À l'intérieur des exploitations agricoles, l'érosion hydrique engendre des pertes de rendement. Les semences et les plantes peuvent entre autres être transportées hors de la parcelle cultivée. De plus, la matière organique du sol, les fertilisants et les pesticides peuvent être transportés à l'extérieur du champ, lors des forts épisodes de ruissellement. À plus long terme, l'érosion hydrique engendre des impacts négatifs sur la qualité du sol et par le fait même sur sa productivité. Le morcellement des agrégats du sol et le déplacement de particules fines et de matière organique provoqués par l'érosion peuvent détériorer la structure et même modifier la texture du sol (Arnold *et al.*, 1989).

Au Québec, il y a un intérêt croissant pour les projets de restauration de rivières en milieu agricole. Afin de choisir des mesures de conservation efficaces, il est important, préalablement, de cibler les problématiques inhérentes au territoire. Puisque les processus d'érosion diffèrent d'un endroit à l'autre, en fonction des caractéristiques intrinsèques aux bassins versants, nous devons obtenir des informations locales et précises sur les processus d'érosion. Dans un projet de restauration de rivière, il est également important de se fixer des objectifs de restauration mesurables et réalistes. De fait, afin de restaurer les tronçons altérés par l'érosion, il est important d'obtenir des informations sur leur comportement hydro-sédimentologiques sous des conditions naturelles. Ces informations peuvent alors être utilisées pour évaluer le succès d'une restauration pour un endroit spécifique du cours d'eau.

Depuis 2002, l'UPA de la Mauricie et ses partenaires oeuvrent dans un projet de restauration de la rivière des Envies et de ses tributaires. Les efforts de restauration des cours d'eau sont ciblés sur le territoire agricole, là où les pressions environnementales sont plus intenses. Notre projet de recherche a été réalisé sur une partie du territoire agricole du bassin versant de la rivière des Envies afin de mieux comprendre les régimes d'érosion propre à ce milieu. Plus précisément, notre recherche entend démontrer la variabilité saisonnière des régimes d'érosion et mettre en lumière les facteurs qui les contrôlent. En outre, cette maîtrise a également pour but de déterminer des objectifs de restauration.

Ce mémoire se divise en cinq chapitres et présente la démarche et les résultats obtenus au terme de ce projet. Dans un premier temps, le premier chapitre dresse une revue de littérature sur les processus d'érosion et se termine par l'énoncé des objectifs spécifiques de l'étude. Le second chapitre décrit la région d'étude ainsi que la démarche méthodologique. Le troisième chapitre énonce les principaux résultats

obtenus et le quatrième chapitre mène à une discussion des résultats, appuyée sur la littérature. Enfin, les principales conclusions de ce projet de recherche sont présentées au chapitre cinq.

## 1.1 ASPECTS THÉORIQUES

### 1.1.1 Formes d'érosion hydrique

Le processus d'érosion se déroule en trois principales étapes soit le détachement, le transport et la déposition. Dans la littérature, on distingue trois grands types d'érosion, soit l'érosion en nappe, l'érosion en rigole et le ravinement.

#### En nappe (*Interrill*)

Selon le Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ) (2000), l'érosion en nappe se caractérise par le déplacement des particules de sol sous l'action combinée du martelage des gouttes de pluies et du ruissellement. Selon Arnold *et al.* (1989), cette forme d'érosion résulte de l'effet combiné de la pluie et du ruissellement qui éclabousse le sol, détruit sa structure et déplace les particules sous l'action de l'écoulement de surface. Elle se produit assez uniformément sur la pente et peut passer inaperçue jusqu'à ce que le sol arable soit perdu.

#### En rigole (*Rill*)

Selon le CPVQ (2000), l'érosion en rigole résulte du décrochement des particules de sol sous l'effet de l'eau de ruissellement concentré en des chemins

préférentiels. Elle est beaucoup plus perceptible que l'érosion en nappe car elle laisse des cicatrices sur les champs. Cette forme d'érosion est caractérisée par la formation de rigoles ou de ravines sur la surface en culture ou aux abords du champ près d'un fossé. Selon Arnold *et al.* (1989), l'érosion en rigole résulte de la concentration du ruissellement, en petits canaux assez bien définis. Ces canaux sont appelés des rigoles lorsqu'ils sont assez petits pour ne pas interférer avec les opérations de la machinerie. Ces mêmes canaux érodés deviennent des ravins lorsqu'ils progressent et s'étendent au point de ne pouvoir être comblés par les opérations normales de travail du sol, ou lorsqu'ils deviennent nuisibles au travail du sol.

#### Ravinement (*Gully*)

Selon Hilborn (1996), le ravinement est un stade avancé de l'érosion en rigole où les canaux de surface ont creusé leur talweg à tel point que le travail du sol ne suffit plus à le combler. L'érosion en ravin survient surtout sur les berges des cours d'eau encaissés et dans les longues vallées inclinées. De grandes quantités de terres arables disparaissent chaque année à cause de cette forme d'érosion. La définition du ravinement semble être ambiguë dans la littérature du fait que les critères de distinction entre l'érosion en rigole et le ravinement varient d'un chercheur à l'autre. Toutefois, selon Poesen *et al.* (2003), une section transversale ayant une aire d'environ 900 cm<sup>2</sup> distinguerait les rigoles (*rills*) des ravins (*gullies*).

#### 1.1.2. Facteurs qui influencent l'érosion

##### L'érosion en nappe et l'érosion en rigole

Au cours des trente dernières années, en raison des besoins pressants des gestionnaires de l'eau et de l'amélioration des appareils informatiques, la



communauté scientifique a mis en branle plusieurs études visant à développer des outils d'aide à la décision, entre autres des modèles sur les processus de l'érosion. Ces modèles de prédiction de l'érosion, qui intègrent et font interagir les facteurs qui influencent l'érosion, furent calibrés à l'aide de plusieurs données acquises sur le terrain. RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) est l'un de ces modèles d'érosion. Développé dans les années quatre-vingt-dix, ce modèle, chapeauté par un programme de recherche d'envergure du United States Department of Agriculture (USDA), fait l'objet d'une constante évolution. Considérant ce modèle, les principaux facteurs qui influencent l'érosion en nappe et en rigole en milieu agricole sont (1) le climat, principalement la pluie, (2) les types de sols, (3) la topographie et (4) l'utilisation du territoire et plus particulièrement les pratiques culturales (USDA, 2003).

- Le climat

Selon Stone (2000), plus les précipitations sont intenses et de longue durée, plus le ruissellement et les risques d'érosion sont élevés. Selon Arnold *et al.* (1989), l'impact des gouttes de pluie peut briser les agrégats et disperser les particules de sol les rendant ainsi plus enclines à l'érosion. En outre, le taux de ruissellement est souvent accru si, durant les événements de pluie, l'infiltration est diminuée par la compaction, la formation d'une croûte ou le gel.

- La nature du sol

La texture est le principal facteur qui influence la susceptibilité du sol à l'érosion. Certains éléments comme la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle (Stone, 2000). Selon Arnold *et al.* (1989), les sables grossiers, les loams et les argiles compactes tendent à s'éroder moins que les

limons, les sables très fins et certains loams argileux. Par contre, selon Poesen *et al.* (2003), la contribution du ravinement aux pertes totales de terre est plus importante là où le sol est argileux. Là où la texture des sols est plus grossière, la contribution de l'érosion en rigole devient plus importante.

- La topographie

Selon Stone (2000), plus la pente est forte et longue, plus le risque d'érosion est élevé. En fait, l'augmentation du degré de l'inclinaison de la pente amène un accroissement de la vitesse de ruissellement de l'eau et une diminution du taux d'infiltration, ce qui crée une augmentation de la quantité de ruissellement.

- L'utilisation du territoire

Selon de Vente *et al.* (2005), le type de couvert végétal joue un rôle important dans le processus de l'érosion et ce de différentes façons. Un couvert forestier protège le sol et a une influence bénéfique sur la structure et la capacité d'infiltration du sol. Selon Arnold *et al.* (1989), le risque d'érosion augmente avec la diminution du couvert végétal et du pourcentage de résidus de culture sur les terres agricoles.

- Les pratiques culturales

Dans le territoire du bassin versant occupé par l'agriculture, certaines pratiques culturales peuvent prédisposer les sols à une dégradation. Dans la littérature, le travail conventionnel (charrue à versoir) est généralement perçu comme étant assez néfaste pour la conservation des sols. D'autre part, le travail réduit et le semis direct sont considérés comme des systèmes culturaux mieux adaptés pour la conservation des sols. Selon Stone (1996), le travail réduit implique une réduction de

30 % des pertes des sols par rapport au travail conventionnel alors que le semis direct implique une réduction de 80 %. Comparativement au travail conventionnel, les réductions de volumes d'eau de ruissellement pour le travail réduit et le semis direct sont de 70 % (Fawcett *et al.* 1994). La monoculture, surtout de maïs, contribue à dégrader de façon importante la structure du sol (Stone, 1996). Les cultures à petites interlignes comme les céréales, ainsi que les cultures de pleines surfaces comme les prairies sont beaucoup moins propices à l'érosion que les cultures à larges interlignes comme le maïs. Comparativement à une monoculture de maïs, le foin et les cultures de pâture réduisent les pertes de sol d'environ 90 % (Stone, 1996). La gestion des résidus de culture a également un impact majeur sur la réduction de l'érosion. Les résidus protègent le sol contre la force de l'eau en jouant un rôle de bouclier face aux gouttes de pluie et en ralentissant la vitesse de l'eau qui ruisselle à la surface du sol. Ils protègent également le sol contre le vent en agissant comme de petites haies brise-vent. Plus la couverture en résidus de culture sera appréciable, plus le ruissellement et l'érosion vont tendre à diminuer. Par conséquent, les pertes en éléments nutritifs et pesticides dans les eaux de surface seront limitées. De plus, les résidus de culture permettent au sol de surface de s'enrichir en matières organiques et d'améliorer ses propriétés physiques, chimiques et biologiques (CPVQ, 2000). Selon Laverdière (1994), une couverture en résidus sur le sol égale à 20 % permettrait de réduire de moitié les pertes de sol par l'érosion et une couverture de 60 % permettrait une réduction de 85 %.

- Les bandes riveraines

Des mesures de conservation des sols telles les bandes riveraines peuvent contribuer à la réduction du transport des sédiments et sont également prises en compte dans RUSLE. Les bandes riveraines sont utilisées à des fins de stabilisation des berges et pour ralentir, retenir et détourner les eaux de ruissellement. Les résultats

d'une étude sur un bassin versant agricole de 6 km<sup>2</sup> démontrent une réduction significative des matières en suspension avec l'aménagement de bandes arbustives et l'exclusion du bétail (McKergow et al., 2003). Les exportations de sédiments provenant du bassin versant ont baissé de 100 à moins de 10 kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> (McKergow et al., 2003). Au Québec, les résultats d'une étude réalisée en conditions expérimentales sur l'efficacité de bandes enherbées de longueurs variables ont démontré que les bandes enherbées de trois mètres permettent une réduction d'environ 48 % du ruissellement de surface, de 90 % des sédiments en suspension, de 69 % de l'azote totale et de 86 % du phosphore total (Duchemin et Majdoub, 2004).

Selon de Vente et al. (2005), L'une des principales faiblesses liée à l'utilisation de RUSLE est qu'il ne tient pas compte de l'érosion en ravin. Également, malgré un certain nombre d'études réalisées sur l'effet des « conditions de dégel » sur l'érosion hydrique, RUSLE n'est pas adapté aux régions soumises à ce type de conditions (de Vente et al., 2005).

### Le ravinement

Le ravinement est souvent la principale source de sédiments dans les cours d'eau (de Vente *et al.*, 2005 ; Huon *et al.*, 2005 ; Krause *et al.*, 2003 ; Wasson *et al.*, 2002). Cependant, cette forme d'érosion est rarement ciblée par les programmes de gestion et de conservation des sols (Poesen *et al.*, 2003 ; Garen *et al.*, 1999 ; Poesen *et al.*, 1996 ; Liggitt et Fincham, 1989). Selon Poesen *et al.* (2003), au cours des dernières décennies, la plupart des recherches sur l'érosion ont traité de l'érosion en nappe et en rigole. Peu d'études ont été réalisées sur le ravinement en raison de la difficulté à mesurer cette forme d'érosion et à la prédire. Malgré un manque de connaissance sur le sujet, certaines études se sont tout de même intéressées aux facteurs qui contrôlent le ravinement en milieu agricole. Comme pour l'érosion en

nappe et en rigole, parmi ces facteurs, on note également l'utilisation du territoire et les pratiques culturelles, le type de sol, la topographie et le climat.

- Les pratiques culturelles

L'accès du bétail au cours d'eau est considéré comme une cause importante du ravinement (Nyssen *et al.*, 2004 ; Gomez *et al.*, 2003). Les résultats d'une étude visant à évaluer les pertes de sol avant et après l'installation de clôtures le long d'un cours d'eau sur un bassin versant de 26 ha démontrent que durant les 5 années suivant le retrait du bétail au cours d'eau, il y a eu une réduction de plus de 50 % de la concentration annuelle de sédiments en suspension et les pertes de sol furent réduites de 40 % (Owens *et al.*, 1996). Les systèmes de drainage peuvent également être la source de développement de ravins. Burkard et Kostascluk (1997) attribuent l'augmentation du ravinement le long des rives du lac Huron à l'intensification du drainage souterrain. Le type de travail du sol a également une influence sur le ravinement. Plusieurs études ont clairement documentées la grande résistance du semis direct au ruissellement concentré, contrairement au travail du sol conventionnel (labour) (Poesen et Govers, 1990 ; Ouvry, 1989 ; Laflen, 1985).

- La nature des sols

Selon Evans (1993), la contribution du ravinement dans les pertes totales de sol est plus importante dans les endroits dominés par des textures lourdes comme l'argile. Dans les régions où les sols sont plus sableux et limoneux, il semble que ce soit l'érosion en nappe et en rigole qui domine.

- La topographie

Les cas de ravinement intenses sont souvent présents dans les régions montagneuses et vallonnées caractérisées par de fortes pentes (Esteves *et al.*, 2005 ; Mathys *et al.*, 2005 ; Gomez *et al.*, 2003 ; Nyssen *et al.*, 2002). Les fortes pentes favorisent un ruissellement rapide et par le fait même la formation de ravins.

- L'utilisation du sol

La déforestation, à des fins agricoles, augmente de façon importante le ravinement des berges d'un cours d'eau. En Nouvelle-Zélande, un vaste programme de reforestation en 1962 sur un bassin versant de 29 km<sup>2</sup> a réduit la contribution du ravinement aux pertes de sol de 62 % (Gomez *et al.*, 2003). Cette étude démontre également que la période de temps avant d'entrevoir une amélioration, suite à un programme de reforestation, peut être longue. Selon Li *et al.* (1991), le système racinaire des végétaux offre une bonne résistance au ruissellement concentré. Selon le même auteur, le couvert végétal doit être près de la surface du sol. Selon Valentin *et al.* (2005), les grands arbres démunis de sous-bois peuvent induire une accélération du ruissellement au lieu de l'intercepter et peuvent favoriser l'initiation de ravinement. C'est pourquoi de petits arbustes offrent une meilleure protection contre le ravinement.

- Le climat

Comme pour l'érosion en nappe et en rigole, les pluies intenses et de longue durée favorisent le ravinement. Les terres sont particulièrement à risque lorsqu'il y a une longue période de sécheresse qui favorise la formation d'une croûte, suivi de pluie intense qui se traduit par un ruissellement concentré et rapide sur les terres

(Valentin *et al.*, 2005). Dans les régions où il y a des accumulations de neige durant l'hiver, il semble que la fréquence des cycles gel/dégel augmente considérablement les risques de ravinement (Oygarden, 2003 ; Archibold *et al.*, 2003).

### 1.1.3 Contribution respective des formes d'érosion

La contribution respective des formes d'érosion aux pertes totales en sol pour un territoire donné dépend de plusieurs facteurs dont l'échelle spatiale et temporelle ainsi que les facteurs environnementaux (Poesen *et al.*, 2003). Une compilation de données de plusieurs sources différentes indique que la contribution du ravinement aux pertes totales de sol peut varier considérablement d'un endroit à l'autre ainsi que d'une étude à l'autre (voir l'annexe A). Selon Poesen *et al.* (2003), une contribution faible du ravinement dans les pertes totales de sol peut être attribuable à une superficie limitée de l'aire d'étude considérée. Par exemple, les résultats d'une étude réalisée par Poesen *et al.* (1996) démontrent qu'en considérant une aire d'étude de 2,6 ha, les processus d'érosion en nappe et en rigole dominaient et produisaient plus de pertes de sol que l'érosion par ravinement. Lorsque l'aire d'étude fut agrandie à 10 ha, le ravinement contribuait pour 85 % aux pertes en sol. Ainsi, selon la superficie de l'aire d'étude considérée, le pourcentage d'érosion due au ravinement variait entre 33 % et 85 %. D'autres auteurs (Osterkamp et Toy, 1997) ont obtenu des résultats similaires. Selon Poesen *et al.* (2003), il y a également une variabilité de la contribution de chacun des types d'érosion en fonction de l'échelle temporelle étudiée. Par exemple, une étude réalisée en Belgique révèle que l'importance relative du ravinement dans la perte totale de sol est fortement influencée par les saisons. Selon cette étude, le ratio moyen du taux d'érosion par ravinement sur le taux d'érosion en rigole est égale à 1,7 en hiver, période durant laquelle il y a plusieurs épisodes de fonte des neiges, et à 1 en été (Vandaele et Poesen, 1995). Le cadre méthodologique de notre projet de recherche ne permettra pas de distinguer

clairement la contribution relative des différentes formes d'érosion. Cependant, il permettra d'amener certaines pistes de réflexion, notamment en ce qui concerne à la contribution du ravinement lors des événements de fonte.

#### 1.1.4 Variabilité saisonnière de l'érosion

Selon Oygarden (2003), dans les pays nordiques, les taux d'érosion suivent souvent un patron saisonnier où les pertes de sol sont plus importantes durant la fin de l'automne et la période de fonte des neiges. Au Québec, le ruissellement sur les terres agricoles est à son maximum au printemps, alors que les sols sont souvent saturés, que la neige fond et que le couvert végétal est à son minimum. En plus d'avoir une influence importante sur les conditions de ruissellement, les périodes de dégel ont pour conséquence de provoquer des changements de conditions édaphiques. Une étude visant à évaluer les variations saisonnières de la vulnérabilité des sols dans le sud du Québec a démontré que le risque d'érosion des sols partiellement gelés était plus élevé que sous d'autres conditions; et ce généralement d'un ordre de magnitude ou plus (Kirby et Mehuys, 1987). De plus, selon Oygarden (2003), un sol gelé en profondeur peut jouer le rôle d'une couche imperméable et contribuer à la saturation du sol en surface et par le fait même à l'augmentation de sa vulnérabilité à l'érosion et au ravinement. Il est difficile de bien cerner la part de l'érosion provoquée par la fonte des neiges car le processus de la fonte varie d'une année à l'autre. Cette difficulté fut illustrée par les résultats d'une étude de Wade et Kirkbride (1998) portant sur la réponse de deux événements de fonte des neiges réalisée sur un même champ ayant reçu une couverture de neige semblable. La quantité de pertes de terre associée au premier événement de fonte fut évaluée à  $76 \text{ m}^3$  et celle du deuxième à  $5 \text{ m}^3$ . Selon ces auteurs, des différences dans l'uniformité du couvert de neige, la durée de la période de dégel, la couverture végétale sur le champ ainsi que la quantité et l'intensité des pluies au cours de la période de dégel sont des facteurs qui peuvent



expliquer ces résultats. Cette étude démontre la complexité de la relation entre l'érosion et les événements de fonte des neiges.

#### 1.1.5 Les objectifs de restauration

Afin de restaurer des secteurs altérés par l'activité anthropique, il est important d'obtenir des informations sur leur comportement en conditions naturelles. Ces informations peuvent alors être utilisées pour évaluer le succès d'une restauration pour un endroit spécifique. Rheinhardt *et al.* (1999) indiquent que des sites relativement non impactés peuvent constituer des conditions de référence et être utilisés pour déterminer des objectifs de restauration. Dans la littérature, plusieurs concepts et méthodes sont proposés pour y parvenir.

Stoddard *et al.* (2006) distinguent quatre principaux concepts de conditions de référence, soit *minimally disturbed condition* (MDC), *historical condition* (HC), *best attainable condition* (BAC) et *least disturbed condition* (LDC). Chacun de ces concepts sont reliés à différentes méthodes pour déterminer les objectifs de restauration. Le MDC implique une description du cours d'eau dans un secteur qui n'est pas perturbé par les activités anthropiques. Par exemple, un cours d'eau de tête dans un environnement à l'état naturel pourrait constituer un MDC. Ce type de conditions de référence peut varier naturellement dans le temps en fonction des changements climatiques, géologiques, écologiques (non anthropique). Selon Hughes *et al.* (1986), l'approche MDC peut être remise en question puisque les sites privilégiés pour cette approche sont souvent en milieux forestiers et ne peuvent être représentatif d'un cours d'eau qui évolue dans un environnement agricole. Le HC implique la description de l'état d'un cours d'eau avant qu'il ne soit altéré (Stoddard *et al.*, 2006). Cet état peut correspondre à la période préindustrielle, la période avant l'implantation d'une agriculture intensive (Wallin *et al.*, 2003) ou avant la

colonisation (Hughes *et al.*, 1998). Ainsi, le HC ne fait pas nécessairement référence à une date fixe mais peut définir un stade spécifique d'occupation du territoire. Selon Hughes *et al.* (1986), l'approche historique est rarement utilisable puisqu'elle fait souvent face à un manque de données qui ne permet pas une bonne connaissance des conditions de référence. Troisièmement, Stoddard *et al.* (2006) définissent le BAC comme étant la condition voulue d'un site perturbé si la meilleure gestion du territoire possible était effective. C'est une condition de référence théorique définie en fonction des objectifs de gestion, des connaissances du territoire, des comités publics (etc.). Le BAC est une condition qui n'existe pas encore mais qu'il serait réaliste d'atteindre. Enfin, le LDC consiste en un état trouvé par la rencontre des meilleures conditions physiques, chimiques et biologiques disponibles dans le paysage concerné. Cette condition de référence répond à un état qui correspond à ce que l'on considère comme étant le moins perturbé possible par l'humain, dans l'état actuel. Le LDC est défini par des critères qui sont différents d'une région à l'autre, en fonction de l'utilisation du territoire et des caractéristiques du paysage. Par exemple, une condition de référence déterminée par la méthode LDC en milieu urbain serait différente de celle déterminée en milieu agricole.

Selon Hughes *et al.* (1986), les sites de référence pour estimer les conditions à atteindre devraient être idéalement le moins perturbés possible, tout en étant représentatifs des régions pour lesquelles ils sont des références. L'approche LDC est souvent utilisée et plusieurs chercheurs s'entendent sur le fait que cette méthode est scientifiquement valable (Stoddard *et al.*, 2006 ; Bailey *et al.*, 2004 ; Hughes, 1995). De plus, dans la mesure où nos sites de références doivent être représentatifs d'un milieu agricole, cette méthode semble être la mieux adaptée à notre projet. Pour ces raisons, c'est l'approche LDC qui fut privilégiée pour définir les objectifs de restauration de notre zone d'étude.

### 1.1.6 Les régimes d'érosion et les *sediment rating curves*

Afin d'analyser la variabilité spatio-temporelle des régimes d'érosion des bassins versants à l'étude, la méthode des *sediment rating curves*, que l'on peut traduire par « courbes d'apport sédimentaire », est utilisée. On entend par « régime d'érosion » l'ensemble des processus d'érosion et de transport des sédiments qui s'opère dans un bassin versant (Walling et Webb, 1982 ; Asselman, 2000). Les *sediment rating curves* sont des modèles de régression simple qui mettent en relation les débits et les concentrations de sédiments en suspension. Plusieurs auteurs ont utilisé cette méthode pour isoler des effets saisonniers (Lecce et al., 2006 ; Wood, 1977 ; Walling, 1974) ou pour comparer des régimes d'érosion pour différents bassins versants (Asselman, 2000 ; Morgan, 1995 ; Sarma, 1986 ; Walling, 1974). Les *sediment rating curves* sont le plus souvent exprimées par une fonction de puissance (Asselman, 1999 et 2000 ; Church et Gilbert, 1975) :

$$C = aQ^b$$

C : Concentration en sédiments en suspension

a : Ordonnée à l'origine

Q : Débit

b : Pente

Selon certains auteurs, les coefficients *a* et *b* ont des significations physiques. Pour Asselman (2000), l'ordonnée à l'origine peut être considérée comme un indice de disponibilité des sédiments alors que la pente représente le pouvoir érosif de la rivière.

## 1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'analyse de la littérature sur l'érosion et les objectifs de restauration permet de soulever deux problèmes auxquels notre projet de recherche s'intéresse plus particulièrement. La première met en relation les facteurs qui contrôlent les régimes d'érosion et leur variabilité saisonnière. Selon plusieurs études, les changements de conditions climatiques saisonniers, en l'occurrence les conditions de fonte des neiges, engendrent une variabilité temporelle dans les régimes d'érosion. Au Québec, une forte proportion des pertes de sol annuelles (jusqu'à 75 %) se produit durant les périodes de fonte des neiges, au printemps et à la fin de l'automne. Néanmoins, les facteurs contrôlant les régimes d'érosion en période de fonte demeurent méconnus. En effet, nous départageons encore assez mal les facteurs qui contrôlent les régimes d'érosion durant les périodes de fontes de ceux qui prévalent durant la période estivale. Comme le précise Kirby et Mehuys (1987), les mesures de contrôle de l'érosion qui ont été reconnues comme étant efficaces durant l'été peuvent être moins efficaces contre l'érosion provoquée par les conditions printanières. En ce sens, il est d'autant plus important d'approfondir nos connaissances sur les régimes d'érosion en période de fonte.

Le deuxième problème met en lumière la nécessité de fixer des objectifs de restauration réalistes et de déterminer des critères précis pour mesurer l'atteinte de ces objectifs. Les objectifs de restauration sont un point de référence qui permet de mesurer la progression d'un projet de restauration (Hughes *et al.*, 1990). Sans objectifs clairs, il est impossible de démontrer la réussite d'un projet de restauration en terme de gains environnementaux.

De ces problématiques découlent les objectifs spécifiques de notre étude soit :

- 1- Évaluer quels sont les facteurs qui influencent les régimes d'érosion des bassins versants à l'étude, et ce pour différentes saisons.
- 2- Établir quelle concentration de sédiments en suspension devrait être ciblée comme objectif de restauration pour les petits bassins versants agricoles dans le bassin versant de la rivière des Envies.
- 3- Proposer des mesures de conservation qui permettraient d'atteindre les objectifs de restauration.

## CHAPITRE II

### MATÉRIEL ET MÉTHODES

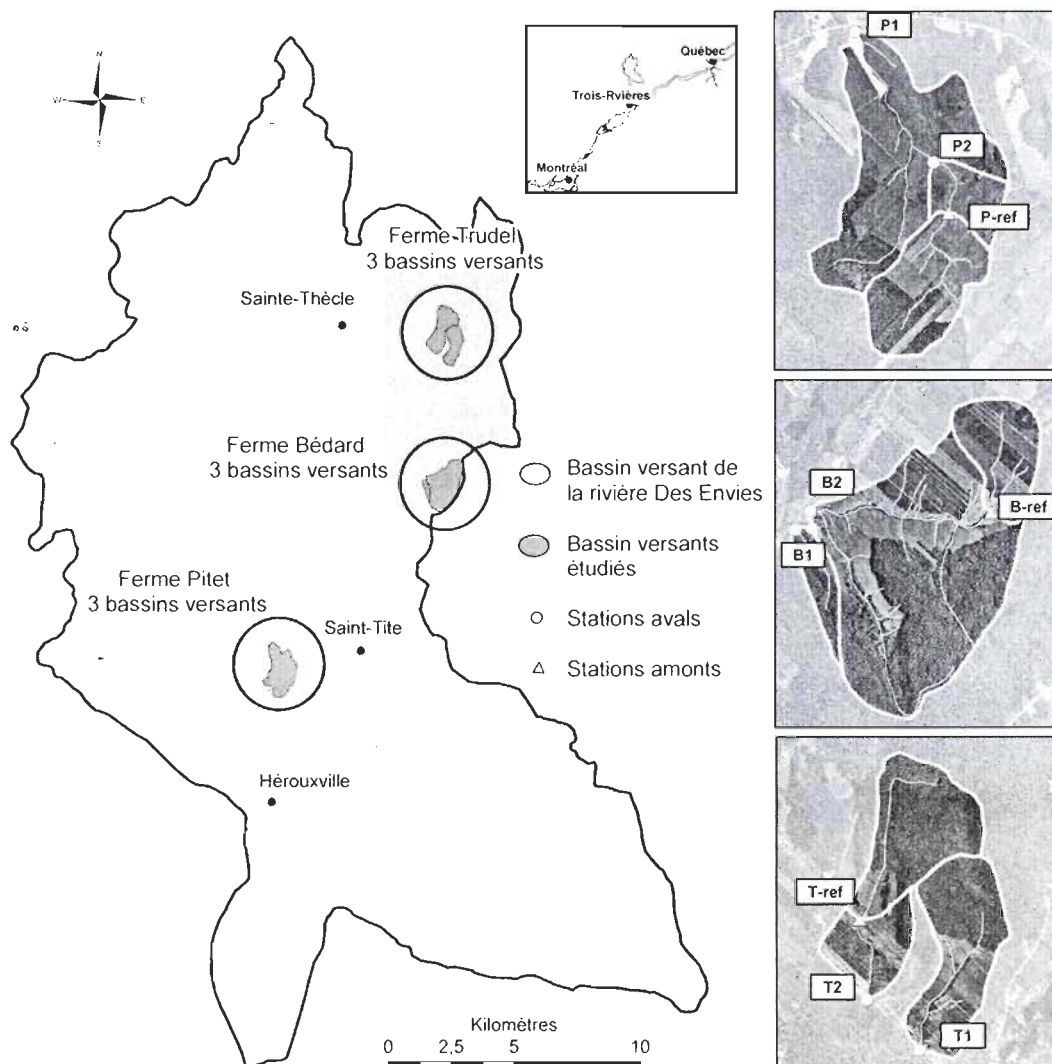
#### 2.1 AIRE D'ÉTUDE

L'aire d'étude est située sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent à la transition des Basses terres du Saint-Laurent et du Bouclier Canadien dans les municipalités de Saint-Tite (46°44'N; 76°37'O) et de Sainte-Thècle (46°50'N; 76°37'O). Cette zone de transition est caractérisée par un paysage dominé par de petites collines (Figure 2.1). L'altitude des neuf sous bassins varie de 140 à 240 m.



**Figure 2.1** Confluence du sous bassin B2 (printemps 2006)

Un suivi des débits et des concentrations de sédiments en suspension (CSS) fut réalisé à la confluence de neuf sous bassins (0,12 à 1,76 km<sup>2</sup>) du bassin versant de la rivière des Envies. Les neuf bassins versants à l'étude sont situés chez trois producteurs agricoles, soit la ferme Pitet (trois bassins versants), la ferme Bédard (trois bassins versants) et la ferme Trudel (trois bassins versants) (Figure 2.2). Ils se divisent en deux catégories distinctes, soit les bassins versants agricoles et les bassins versants de référence. Notons que la codification des bassins versants à l'étude et de leur station d'échantillonnage est la même (Tableau 2.1). Le choix des sites de référence fut inspiré par la méthode LDC dans la mesure où ils se trouvent dans un paysage représentatif de notre zone d'étude. De fait, les bassins versants de référence se distinguent par des activités agricoles moins intenses, des proportions en forêt plus élevées, et pour le bassin B1, par une large bande riveraine herbacée (15 à 25 mètres), de part et d'autres du cours d'eau. Ils visent à analyser les régimes d'érosion des endroits moins influencés par l'agriculture et à déterminer des objectifs de restauration. Les bassins versants de référence P-ref, B-ref et T-ref sont imbriqués dans les bassins versants P1, B2 et T2 respectivement. De même façon, le bassin versant P2 est imbriqué dans le bassin versant P1.



**Figure 2.2** Localisation des neuf sous bassins à l'étude dans le bassin versant de la rivière des Envies



**Tableau 2.1** Codification des bassins versants et des stations d'échantillonnage à l'étude

Bassins versants et stations d'échantillonnage	
Agricoles	De référence
P1	P-ref
P2	B-ref
B2	T-ref
T1	B1
T2	

La plupart des sols dans la zone d'étude sont composés de loams et sont caractérisés par un gradient textural nord-sud dans lequel les loams sont plus grossiers sur la ferme Pitet et plus fins sur la ferme Trudel. L'agriculture occupe une place importante du territoire et les types de cultures les plus courants sont le maïs, le blé, l'avoine et le fourrage. Les précipitations de pluie annuelles moyennes se situent autour de 820 mm avec les plus grandes quantités de pluie tombées dans les mois de juin, juillet et août. Les précipitations de neige annuelles moyennes se situent autour de 250 cm avec les plus grandes quantités de neige tombées dans les mois de décembre, janvier, et février (Service météorologique du Canada, 2007). Au printemps (mars, avril et mai), le ruissellement intense occasionné par la fonte des neiges accentue les risques d'événements de forte érosion.

## 2.2 SUIVI DES DÉBITS ET DES CONCENTRATIONS DE SÉDIMENTS EN SUSPENSION

Les mesures de débits et les prélèvements d'eau pour l'analyse des concentrations de sédiments en suspension (CSS) peuvent être réalisées manuellement ou à l'aide de stations automatiques. Le prélèvement manuel a pour

avantage d'être relativement simple, de permettre la collecte d'un échantillon intégrant l'ensemble de la colonne d'eau et d'être peu coûteux. De plus, cette méthode nécessite une présence accrue sur le terrain ce qui permet de suivre l'évolution des processus d'érosion et des pratiques culturales et facilite ainsi l'interprétation des données. Cependant, elle a pour inconvénients de ne pas fournir de données en continue et de nécessiter de nombreux déplacements. L'utilisation d'une station automatisée permet d'effectuer des mesures en continue, en utilisant un pas de temps fixe ou un échantillonnage en fonction du débit. Cependant, l'installation d'une station automatisée est coûteuse et doit répondre à des critères contraignants, notamment en ce qui concerne la morphologie du chenal et sa stabilité. De plus, les stations automatiques sont vulnérables aux événements extrêmes et aux débris pouvant obstruer la prise d'eau (Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 2001). Dans le cadre de la présente étude, les mesures ont été effectuées de façon manuelle pour les raisons suivantes :

1. Les chenaux à l'étude sont par définition instables et sujets à l'érosion, ce qui limite les possibilités d'installation de stations automatiques;
2. L'étude s'intéresse particulièrement à la période printanière, au cours de laquelle a lieu la majorité de l'érosion. Or les conditions printanières provoquent des débits importants et se caractérisent par la présence fréquente de débris ou de morceaux de glace dans les cours d'eau, ce qui limite l'utilisation de stations automatiques;
3. L'installation de neuf stations automatiques aurait représenté des coûts considérables.

Les données sur les débits et les CSS des stations agricoles et B1 furent mesurées du 26 octobre 2005 au 20 novembre 2006 à raison de deux fois par semaine

durant le printemps et une fois par semaine durant l'été. Au printemps, les deux mesures hebdomadaires étaient effectuées le plus souvent à deux journées d'intervalle. Les critères utilisés pour choisir les jours de mesures sur le terrain étaient reliés aux événements météorologiques (changements de température, fortes pluies). Du 8 décembre 2005 au 10 mars 2006 (période hivernale), il n'y a pas eu d'échantillonnage puisque les cours d'eau étaient gelés sur toute leur profondeur. Comme l'accès aux stations de référence P-ref, B-ref et T-ref était difficile au printemps, les données furent récoltées uniquement du 6 juin 2006 au 1<sup>er</sup> novembre 2006 à raison d'une fois par semaine. Pour cette raison, les objectifs de restauration ne peuvent être déterminés que pour la période estivale. Le tableau 2.2 illustre le nombre de données récoltées pour chaque station.

**Tableau 2.2** Nombre de campagnes d'échantillonnage pour chaque station d'échantillonnage

Stations d'échantillonnage agricoles	Nombre de campagnes d'échantillonnage
P1	51
P2	40
B2	44
T1	53
T2	46
<b>Stations d'échantillonnage de référence</b>	
B1	33
P-ref	20
B-ref	20
T-ref	20

Pour mesurer les débits, la vitesse du courant fut mesurée avec un courantomètre *Price-type Mini* (USGS) et des mesures de la section mouillée du cours d'eau furent réalisées à chaque station d'échantillonnage, pour chaque

campagnes d'échantillonnage. Les mesures de sections mouillées furent effectuées avec un calcul d'aire de demi-ellipse.

$$\text{Aire de demi-ellipse} = (\pi (W / 2) * D) / 2$$

$$\pi = 3.141592654$$

$W$  = Largeur de la section mouillée (m)

$D$  = Profondeur de la section mouillée (m)

Pour chaque campagne d'échantillonnage, la largeur et la profondeur de la section mouillée furent mesurées à l'aide d'une règle. Les mesures de profondeur furent prises au centre du cours d'eau. Cependant, le lit du cours d'eau n'avait pas toujours une forme ellipsoïde. Par conséquent, au cours d'une campagne d'échantillonnage, les profondeurs des sections mouillées furent mesurées progressivement de part et d'autre du cours d'eau à tous les 10 cm (largeur) et également au centre, pour chaque station d'échantillonnage. Une mesure précise de l'aire de la section mouillée fut ainsi comparée au calcul d'aire de demi-ellipse pour chaque station. La comparaison des aires obtenues à l'aide des deux méthodes ne démontrait pas de différence significative (voir le tableau 2.3). La méthode basée sur la demi-ellipse, plus rapide, fut donc utilisée pour évaluer l'aire de la section mouillée.

**Tableau 2.3** Comparaison entre les méthodes de calcul d'aire de la section mouillée

Station d'échantillonnage	Mesure de la profondeur à tous les 10 cm sur la largeur du cours d'eau (m <sup>2</sup> )	Méthode de calcul d'aire de demi-ellipse (m <sup>2</sup> )
P1	0,23	0,25
P2	0,14	0,16
B2	0,19	0,21
T1	0,22	0,22
T2	0,23	0,20
B1	0,05	0,04
P-ref	0,06	0,07
B-ref	0,04	0,04
T-ref	0,17	0,19

Les mesures de débits furent effectuées au centre du cours d'eau, à partir de l'équation suivante :

$$Q = \text{vitesse (m/s)} * \text{aire de la section mouillée (m}^2\text{)}$$

Pour chaque station d'échantillonnage et pour chaque campagne, deux échantillons d'eau de un litre chacun furent récoltés dans des bouteilles de plastique avec un échantillonneur *DH-8* (USGS) qui permet d'intégrer toute la colonne d'eau. Les mesures de CSS furent réalisées en faisant la moyenne des deux prélèvements par station. Le traitement des échantillons fut réalisé avec la méthode de filtration pour les solides en suspension (Clesceri, 1998). Les filtres utilisés sont en microfibres de verre (1,5 microns) d'un diamètre de 47 mm (Whatman 934-AH). Les CSS furent mesurées considérant le poids des sédiments par litre d'eau (mg L<sup>-1</sup>).

## 2.3 CARACTÉRISATION DES BASSINS VERSANTS ET DES COURS D'EAU

Une caractérisation des facteurs physiques et anthropiques fut réalisée sur les neuf bassins versants à l'étude. L'objectif premier de cette caractérisation était d'isoler les paramètres susceptibles d'influencer les régimes d'érosion.

### 2.3.1 Facteurs physiques

Le tableau 2.2 présente les caractéristiques physiques des bassins versants et des cours d'eau. Celles-ci furent divisées en trois classes, soit l'hydrographie et la physiographie du bassin, la granulométrie du lit du cours d'eau à l'embouchure et la morphologie du cours d'eau. Les données concernant l'aire des bassins versants, la longueur du réseau hydrographique, la densité de drainage et l'ordre de Strahler furent obtenues à partir de la Base de Données Topographiques du Québec (Québec, 2003) et des orthophotographies (Québec, 1998-99).

Tous les cours d'eau à l'étude furent parcourus d'aval en amont à l'été 2007. La longueur de ravinement des berges de part et d'autre des cours d'eau fut alors mesurée. La profondeur et la largeur du lit majeur des cours d'eau, la pente et la longueur de pente des talus furent mesurées à tous les 100 mètres, de part et d'autre des cours d'eau. Également, des échantillons de sédiments dans le lit des cours d'eau furent prélevés aux sites d'échantillonnage. Ces échantillons furent séchés dans une étuve pendant 24 heures à 75°C. Une fois séchés, l'analyse granulométrique de chaque échantillon fut réalisée au moyen d'un tamiseur (colonnes de tamis). Pour chaque échantillon, chacune des portions granulométriques fut pesée afin de connaître la proportion de chacune dans l'échantillon complet. Enfin, Les données récoltées furent compilées et analysées dans le système d'information géographique ArcGIS (v. 9.2).

### 2.3.2 Facteurs anthropiques

Les facteurs anthropiques furent divisés en quatre classes (Tableau 2.3), soit le réseau de drainage, l'utilisation du territoire dans le bassin versant, les cultures et les pratiques culturales et l'utilisation du sol dans la bande riveraine (15 m de part et d'autre du cours d'eau). Les données concernant le drainage souterrain, les types de culture et les pratiques culturales ont été obtenues directement auprès des producteurs agricoles. L'utilisation du territoire dans le bassin versant et la longueur des fossés de drainage furent obtenues à partir de la Base de Données Topographiques du Québec (Québec, 2003) et des orthophotographies (Québec, 1998-99). L'utilisation du sol dans la bande riveraine fut caractérisée sur le terrain au cours de l'été 2007. À tous les 100 mètres, une caractérisation de la bande riveraine fut réalisée de part et d'autre du cours d'eau. Les données récoltées furent compilées et analysées dans le système d'information géographique ArcGIS (v. 9.2).

**Tableau 2.4** Description des facteurs physiques

<b>Hydrographie et physiographie</b>	<b>code</b>	<b>unité</b>	<b>min</b>	<b>max</b>
Aire du bassin versant	A	km <sup>2</sup>	0,12	1,76
Longueur du réseau hydrographique	LH	km	0,57	7,66
Densité de drainage du réseau hydrographique naturel	DDH	km/km <sup>2</sup>	1,95	4,75
Ordre de Strahler	STR	-	1	4
<b>Granulométrie du lit du cours d'eau à l'embouchure</b>				
Granulométrie $\geq 2$ mm	G2mm	%	2	38,7
Granulométrie $\geq 1$ mm et $< 2$ mm	G1mm	%	7,4	16,9
Granulométrie $\geq 500$ $\mu$ m et $< 1$ mm	G500 $\mu$ m	%	11,6	20,1
Granulométrie $\geq 250$ $\mu$ m et $< 500$ $\mu$ m	G250 $\mu$ m	%	7,9	37,1
Granulométrie $\geq 90$ $\mu$ m et $< 250$ $\mu$ m	G90 $\mu$ m	%	12,5	37,6
Granulométrie $\geq 44$ $\mu$ m et $< 90$ $\mu$ m	G44 $\mu$ m	%	4,9	20,2
Granulométrie $< 44$ $\mu$ m	GM44 $\mu$ m	%	3,1	16,2
<b>Morphologie du cours d'eau</b>				
Profondeur moyenne du lit majeur du cours d'eau	PML	m	0,28	0,75
Profondeur du lit majeur $\geq 0$ et $\leq 0.5$ m	PRO0a0.5	%	25	100
Profondeur du lit majeur $> 0.5$ et $\leq 0.8$ m	PRO0.5a0.8	%	0	75
Profondeur du lit majeur $> 0.8$ m	PRO+0.8	%	0	50
Largeur moyenne du lit majeur du cours d'eau	LML	m	1	3,3
Largeur du lit majeur $\geq 0$ et $\leq 2$ m	LAR0a2	%	0	100
Largeur du lit majeur $> 2$ et $\leq 4$ m	LAR2a4	%	0	100
Largeur du lit majeur $> 4$ m	LAR+4	%	0	25
Pente moyenne des talus du cours d'eau	PMT	degré	9,94	22,83
Pente des talus $\geq 0^\circ$ et $\leq 10^\circ$	PTA0a10	%	0	50
Pente des talus $> 10^\circ$ et $\leq 20^\circ$	PTA10a20	%	26,1	100
Pente des talus $> 20^\circ$	PTA+20	%	0	56,5
Longueur moyenne des talus du cours d'eau	LMT	m	3,75	23,34
Longueur des talus $\geq 0$ et $\leq 5$ m	LTA0a5	%	33,3	100
Longueur des talus $\geq 5$ et $\leq 15$ m	LTA5a15	%	0	50
Longueur des talus $> 15$ m	LTA+15	%	0	16,7
Longueur de ravinement des berges divisée par la longueur totale des berges des cours d'eau	RAVIN	m/km	0	15,9



**Tableau 2.5** Description des facteurs anthropiques

<b>Réseau de drainage</b>	<b>code</b>	<b>unité</b>	<b>min</b>	<b>max</b>
Pourcentage du bassin versant avec du drainage souterrain	DS	%	0	32,3
Longueur des fossés de drainage	LDS	km	0	1,98
<b>Utilisation du territoire dans le bassin versant</b>				
Cultures	AC	%	10.5	56,8
Forêts	AF	%	40	89,5
<b>Cultures et pratiques culturales dans les parcelles cultivées</b>				
Maïs	CM	%	0	81,6
Céréales	CC	%	10.5	100
Cultures fourragères	CF	%	0	51.7
Pâturage	CP	%	0	24.1
Labour conventionnel	TDS_C	%	41.3	100
Semi-direct	TDS_D	%	0	58.8
<b>Utilisation du sol dans la bande riveraine (15 m de part et d'autre du cours d'eau)</b>				
Maïs	CLM	%	0	35,6
Céréales	CLC	%	7.5	81.7
Cultures fourragères	CLF	%	0	42.7
Forêts	CLFOR	%	18.4	76
Respect de la bande riveraine de trois mètres	RBR3	%	3.8	93.6

## 2.4 ANALYSES STATISTIQUES

Afin de mesurer la variabilité saisonnière des régimes d'érosion, les données furent séparées en deux classes, soit les données de période de fonte des neiges (printemps et fin de l'automne) et les données de période autre que fonte (été et début automne). Des *sediment rating curves* ont été réalisées pour chacune des saisons et comparées entre-elles. Comme les stations P-ref, B-ref et T-ref n'ont pas été échantillonnées durant les périodes de fontes, l'analyse de la variabilité saisonnière n'a été possible que pour les stations agricoles et B1.

Pour évaluer les facteurs qui influencent la variabilité spatio-temporelle des régimes d'érosion des bassins versants, une matrice de corrélation fut d'abord réalisée entre les caractéristiques des bassins versants et la pente des SRC. Ensuite, les facteurs de caractérisation ayant des corrélations significatives ( $p \leq 0,05$ ) avec les pentes des *sediment rating curves* furent retenus pour effectuer des régressions multiples. Des régressions multiples progressives avec comme variables d'entrées les pentes des *sediment rating curves* (variables dépendantes) et les facteurs anthropiques et physiques des bassins versants (variables indépendantes) furent réalisées pour (1) les événements de fonte, (2) autres que fonte et (3) annuels.

Afin de vérifier la différence entre les patrons d'érosion entre les bassins versants très influencés par l'agriculture et ceux moins influencés par l'agriculture, des comparaisons entre les pentes des *sediment rating curves*, des stations agricoles et des stations de référence furent effectuées. Comme les données des stations de référence P-ref, B-ref et T-ref ont été prises du 6 juin au 28 novembre 2006, seules les données des stations agricoles prélevées durant cette période de temps furent prises en compte. Afin d'amoindrir l'influence des valeurs extrêmes, c'est la médiane de

l'ensemble des données de CSS recueillies aux stations de référence qui fut choisis comme objectif de restauration.

## CHAPITRE III

### RÉSULTATS

#### 3.1 CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent les caractéristiques des neuf bassins versants à l'étude. En général, les superficies et les longueurs du réseau hydrographique sont plus importantes pour les bassins versants agricoles que pour les bassins versants de référence. Concernant la sédimentologie, les stations T2 et T-ref sont caractérisés par une la granulométrie du lit du cours d'eau à l'embouchure plus grossière que les autres bassins versants. En ce qui a trait à la morphologie du cours d'eau, on note que la profondeur moyenne du lit est généralement plus importante pour les bassins versants agricoles. Le bassin versant P1 et ses bassins imbriqués (P2 et P-ref) sont caractérisés par des largeurs moyennes de cours d'eau ainsi que des longueurs moyennes de talus beaucoup plus grandes que les autres. Contrairement aux bassins versants agricoles, dans les bassins versants de référence, toutes les valeurs de ravinement sont nulles. Le drainage souterrain dans les bassins versants de référence est inexistant ou très faible. Également, il n'y a pas de drainage souterrain dans les bassins agricoles P2 et B2. En ce qui concerne les fossés de drainage, leur longueur totale est plus grande dans les bassins agricoles que dans les bassins de référence. À l'exception de B-ref, les bassins versants de référence sont caractérisés par une portion agricole plus faible que les bassins agricoles. Pour les bassins de référence, la portion agricole est dominée par des cultures de céréales et par de faibles proportions en maïs. Notons que sur les bassins B1, B2 et B-ref, des cultures de céréales occupent tout le territoire agricole. À l'exception de P1, plus de 50 % des terres cultivées des bassins versants sont travaillées de façon conventionnelle

(labour). Pour les bassins B1, B2 et B-ref, tout le territoire agricole est travaillé de façon conventionnelle. Pour ces mêmes bassins, une bande riveraine de 3 mètres de part et d'autre du cours d'eau est respectée sur une proportion variant de 60 à 94 % le long du réseau hydrographique. C'est sur le bassin versant P1 et ses bassins imbriqués (P2 et P-ref) que l'on retrouve les proportions de respect de la bande riveraine les plus faibles (3,8 à 19 %).

**Tableau 3.1** Caractéristiques physiques des bassins versants et des cours d'eau

Facteurs physiques	Bassins versants agricoles					Bassins versants de référence			
	P1	P2	B2	T1	T2	P-ref	B-ref	B1	T-ref
<b>Hydrographie et physiographie</b>									
A	1,69	0,67	1,76	0,76	1,13	0,49	0,30	0,12	0,76
LH	5,04	2,15	7,66	1,86	2,63	1,73	1,08	0,57	1,48
DDH	2,98	3,21	4,35	2,45	2,33	3,53	3,60	4,75	1,95
STR	3	2	4	2	2	2	2	1	1
<b>Granulométrie du lit du cours d'eau à l'embouchure</b>									
G2mm	5,4	13,4	5,5	2	20,8	4,3	7,3	9	38,7
G1mm	7,4	12,5	7,6	9,7	16,9	9,3	12,9	10,8	14,6
G500µm	11,9	16,2	12,7	20	20,1	16,6	11,6	14,8	13,8
G250µm	7,9	10,6	18,8	37,1	13,9	11,6	10,8	11,9	10,9
G90µm	37,6	22,6	39,4	23,3	13,5	21,8	35,3	29,9	12,5
G44µm	20,2	15,2	11,2	4,9	6,7	20,2	16,2	15,8	6,4
GM44µm	9,6	9,4	4,6	3	8,1	16,2	5,8	7,8	3,1
<b>Morphologie du cours d'eau</b>									
PML	0,64	0,58	0,56	0,75	0,60	0,51	0,34	0,28	0,63
PRO0a0,5	30	54,6	41,7	33,3	27,3	62,5	100	100	25
PRO0,5a0,8	46,7	18,2	54,2	16,7	72,7	37,5	0	0	75
PRO+0,8	23,3	27,3	4,2	50	0	0	0	0	0
LML	3,17	3,33	1,22	2,65	2,40	3,16	1,63	1,04	1,78
LAR0a2	26,7	54,6	91,7	33,3	45,5	50	75	100	0
LAR2a4	56,7	27,3	8,3	58,3	54,6	25	25	0	100
LAR+4	16,7	18,2	0	8,3	0	25	0	0	0
PMT	16,60	11,89	14,54	17,13	17,65	9,94	11,63	20,04	22,83
PTA0a10	17,4	40	33,3	16,7	0	50	50	0	0
PTA10a20	26,1	40	45,8	50	90	50	50	100	66,7
PTA+20	56,5	20	20,8	33,3	10	0	0	0	33,3
LMT	13,6	20,7	8,1	8,8	4,8	23,3	4,5	5	3,8
LTA0a5	60,9	100	41,7	33,3	70	100	75	50	100
LTA5a15	30,4	0	45,8	50	30	0	25	50	0
LTA+15	8,7	0	12,5	16,7	0	0	0	0	0
RAVIN	15,67	4,42	1,11	15,86	7,22	0	0	0	0

**Tableau 3.2** Caractéristiques anthropiques des bassins versants et des cours d'eau

Facteurs anthropiques	Bassins versants agricoles					Bassins versants de référence			
	P1	P2	B2	T1	T2	P-ref	B-ref	B1	T-ref
<b>Réseau de drainage</b>									
DS	32,3	0	0	31,9	29,3	0	0	0	2,8
LDS	1,04	0,61	1,98	1,83	1,26	0,61	0,43	0	0,18
<b>Utilisation du territoire</b>									
AC	53,3	44,8	45,5	50	34,5	30,6	56,7	33,3	10,5
AF	45,5	50,8	54	50	65,5	63,3	40	66,7	89,5
<b>Pratiques culturelles</b>									
CM	25,3	0	0	55,3	81,6	0	0	0	25
CC	12,1	37,9	100	13,2	10,5	66,7	100	100	50
CF	51,7	37,9	0	31,6	7,9	33,3	0	0	25
CP	10,8	24,1	0	0	0	0	0	0	0
CLM	8,6	0	0	30,5	35,6	0	0	0	6,7
CLC	9,9	22,1	46,4	7,5	8	27,7	81,7	57,1	11,8
CLF	36,2	11,6	0	42,7	3,8	12,3	0	0	5,6
CLFOR	36,2	46,8	53,6	19,3	52,6	60,1	18,35	42,9	76
TDS_C	41,25	50	100	55,3	92,1	66,7	100	100	75
TDS_D	58,8	50	0	31,6	7,9	33,3	0	0	25
RBR3	19	3,8	76,2	56,2	41,8	5,5	62,5	93,6	27,8

### 3.2 VARIABILITÉ SAISONNIÈRE DES DÉBITS ET DES RÉGIMES D'ÉROSION

L'analyse de la variabilité saisonnière n'a pu être effectuée que sur les stations qui ont été suivies sur toute l'année. Parmi celles-ci, seule B1 est une station de référence. Nous ne pouvons donc pas dégager de tendances claires en ce qui concerne la variabilité saisonnière des régimes d'érosion pour les bassins versants de référence. Le tableau 3.3 présente les résultats en ce qui concerne les débits moyens spécifiques, aux charges sédimentaires spécifiques et aux concentrations de sédiments en suspension (CSS) moyennes pour les périodes de fonte, autres que fonte et pour toute l'année.

Pour les stations agricoles, les débits moyens spécifiques annuels varient entre 35,72 et 95,65 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>. La station T2 est caractérisée par un débit moyen spécifique annuel beaucoup plus élevé que les autres stations. Toujours pour les stations agricoles, les charges sédimentaires spécifiques annuelles varient entre 4,66 et 16,46 T km<sup>-2</sup>, dont celles des stations P2 et T1 qui sont environ 3 fois moins élevées que les autres. Les CSS moyennes annuelles des stations agricoles varient entre 12,08 et 24,87 mg L<sup>-1</sup>, dont les plus grandes concentrations mesurées aux stations P1 et B2. Si l'on considère les données annuelles, la principale différence observée entre les stations agricoles et la station B1 concerne les CSS. En fait, la station B1 présente une CSS moyenne annuelle de 2 à 5 fois moins élevée que celles des stations agricoles.

Pour les stations agricoles, on remarque que les débits moyens spécifiques sont de deux à trois fois plus élevés au printemps et à la fin de l'automne (fonte) qu'au cours de l'été et au début de l'automne (autre). Pour les stations agricoles, lors des événements de fonte, les charges sédimentaires varient entre 2,10 et 10,96 T km<sup>-2</sup> tandis qu'elles varient entre 2,47 et 9,77 T km<sup>-2</sup> pour les périodes autres que fonte.



C'est à la station P1 que l'on retrouve la plus grande variabilité saisonnière des charges sédimentaires spécifiques (Fonte :  $10,96 \text{ T km}^{-2}$  ; Autre :  $3,75 \text{ T km}^{-2}$ ). Dans tous les cas, les CSS moyennes sont plus élevées lors des événements de fonte. Pour cette période de l'année, les CSS moyennes des stations agricoles varient entre 13,06 et  $40,23 \text{ mg L}^{-1}$  tandis qu'elles varient entre 6,58 et 17,39 pour la période estivale et le début de l'automne. C'est aux stations P2, T2 et B1 que les écarts saisonniers de CSS moyennes sont les plus faibles.

Même s'il y a une variabilité saisonnière des débits moyens spécifiques à la station de référence B1 (Fonte :  $76,76 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  ; Autre :  $48,66 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ) celle-ci est moins notoire que celle observée aux stations agricoles. Pour la station B1, les charges sédimentaires spécifiques observées sont huit fois plus élevées pour la période estivale et le début de l'automne comparativement à la période de fonte. Contrairement aux stations agricoles, la station B1 est caractérisée par une CSS moyenne plus élevée pour la période estivale et le début de l'automne comparativement à celle des événements de fonte.

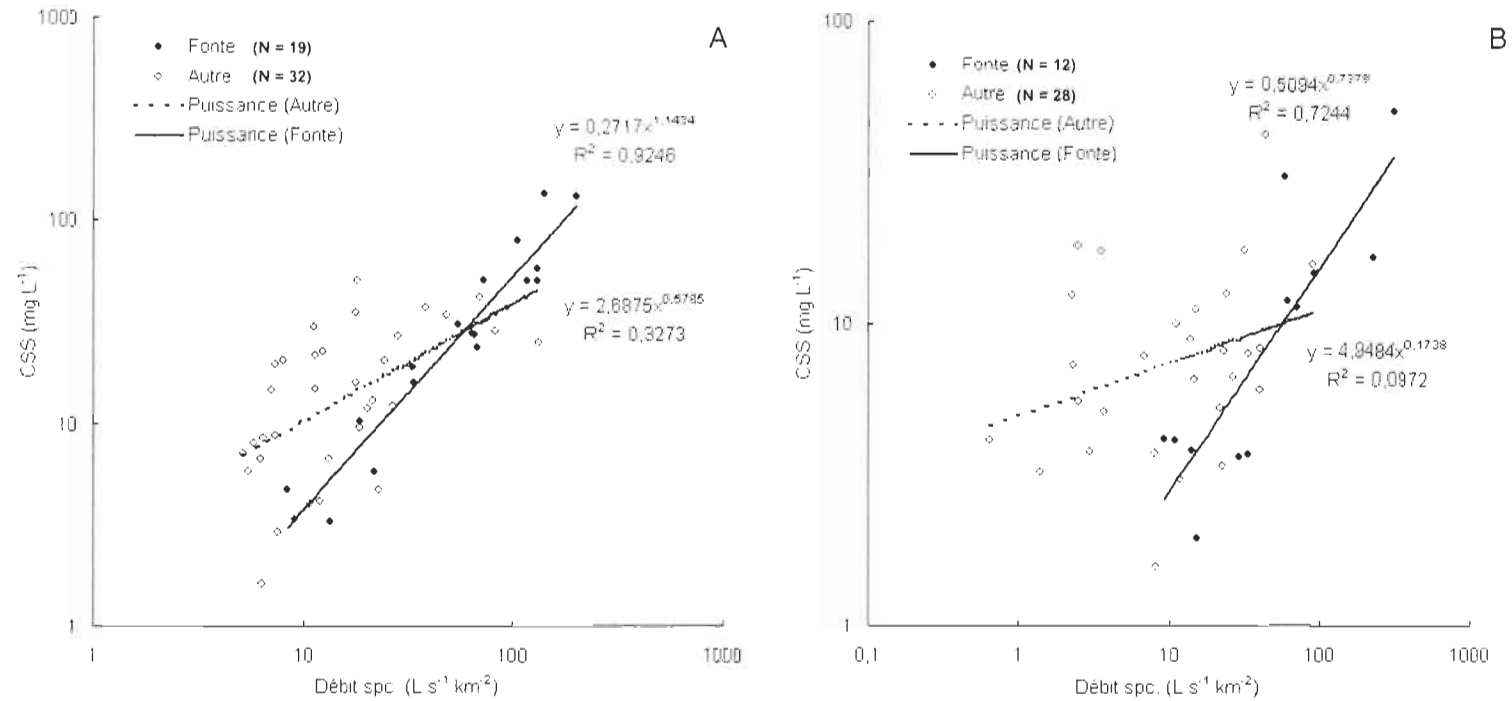
Si on compare la station B1 aux stations agricoles, on observe que pour les événements de fonte, la charge sédimentaire spécifique de la station de référence est de 2 à 10 fois moins élevée. Toujours pour les événements de fonte, la CSS moyenne de la station B1 est de 4 à 13 fois moins élevée que celles des stations agricoles.

**Tableau 3.3** Débits moyens spécifiques, charges sédimentaires spécifiques et concentrations moyennes des sédiments en suspension des stations agricoles et de la station de référence B1 pour les événements de fonte, les autres périodes et pour l'année complète

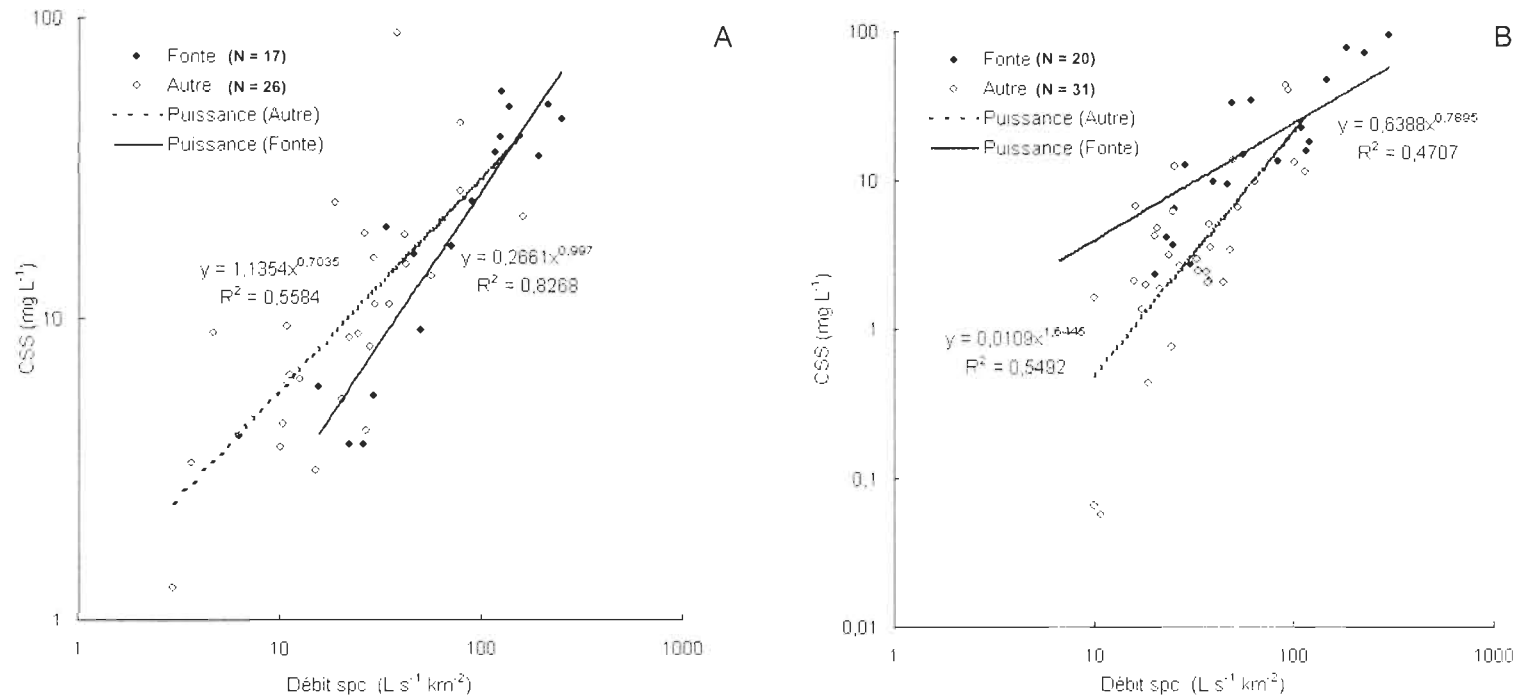
	Débit moyen spécifique ( $L\ s^{-1}\ km^{-2}$ )			Charge sédim. spécif. ( $T\ km^{-2}$ )			CSS moyenne ( $mg\ L^{-1}$ )		
	Annuel	Fonte	Autre	Annuelle	Fonte	Autre	Annuelle	Fonte	Autre
<b>Stations agricoles</b>									
P1	40,00	71,88	22,60	14,70	10,96	3,75	24,87	40,23	17,39
P2	35,72	78,80	17,89	4,66	2,10	2,56	12,08	13,06	11,68
B2	56,32	97,54	32,76	16,37	8,82	7,55	19,06	26,28	14,94
T1	55,39	84,36	37,83	6,37	3,90	2,47	13,88	25,93	6,58
T2	95,65	153,49	58,46	16,46	6,69	9,77	16,93	18,40	15,98
<b>Stations de référence</b>									
B1	57,44	76,76	48,66	6,47	0,74	5,74	5,08	3,06	5,99

Les *sediment rating curves* (SRC) illustrées dans les figures 3.1 à 3.3 montrent la variabilité saisonnière des régimes d'érosion pour les bassins versants dont les stations ont été suivies toute l'année, soit toutes les stations agricoles et la station de référence B1. Pour la plupart des bassins agricoles (P1, P2, B2, T2), les pentes des SRC sont plus abruptes pour les périodes de fonte. Pour ces mêmes bassins versants, on observe que la relation entre les débits et les CSS est beaucoup plus forte ( $R^2$  plus élevé) pour les périodes de fonte que pour la période estivale et le début de l'automne. Parmi les stations agricoles, la station T1 se distingue par des SRC différentes. Pour ce bassin versant, le pouvoir érosif est plus important en période estivale et au début de l'automne qu'en période de fonte. De plus, la relation entre les débits et les CSS est plus forte l'été et au début de l'automne qu'en conditions de fonte.

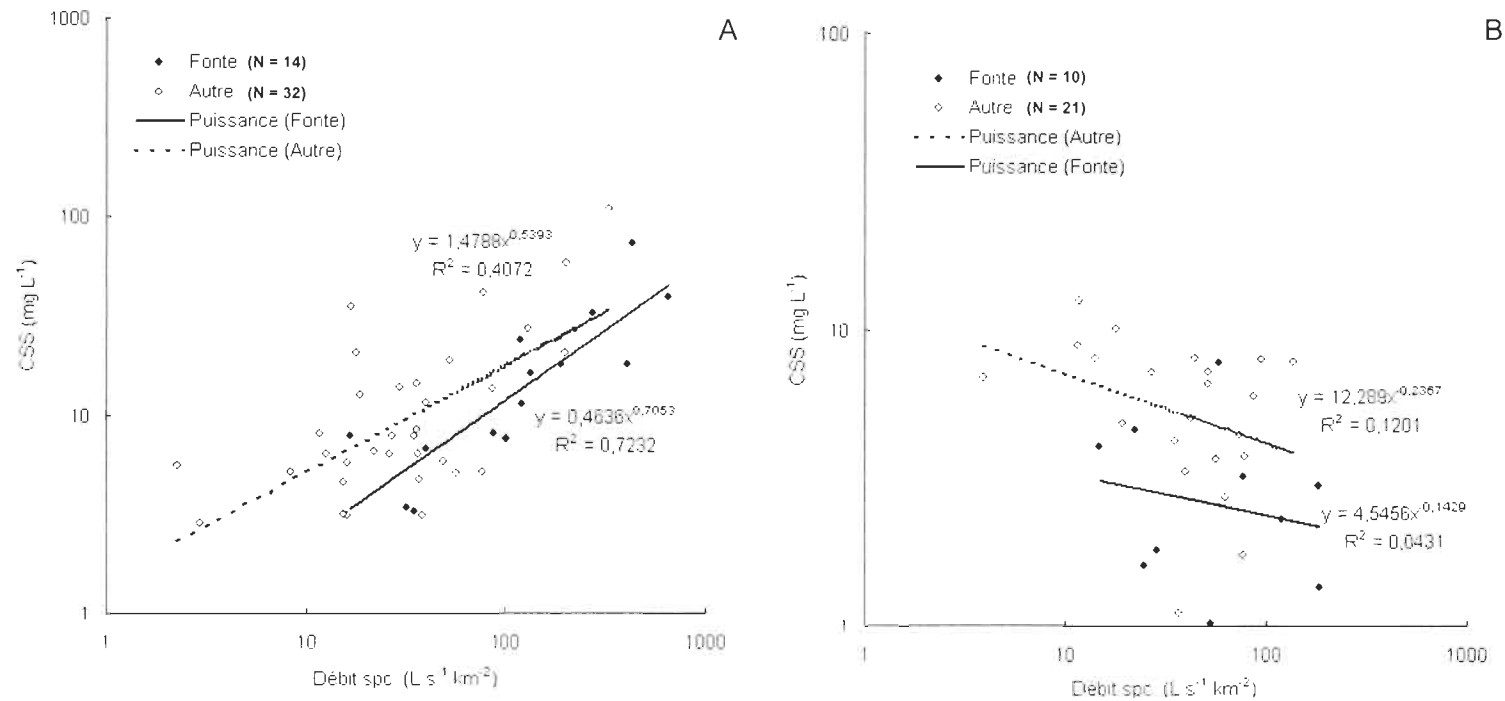
Dans le cas du bassin de référence B1, il ne semble pas y avoir de variabilité saisonnière importante dans les régimes d'érosion. Pour les périodes de fonte comme pour les autres périodes, la relation entre les débits et les CSS est faible, et la pente de la SRC est négative.



**Figure 3.1** *Sediment rating curves* des événements de fonte et autres périodes pour les stations agricoles P1 (A) et P2 (B)



**Figure 3.2** *Sediment rating curves* des événements de fonte et autres périodes pour les stations agricoles B2 (A) et T1 (B)



**Figure 3.3** *Sediment rating curves* des événements de fonte et autres périodes pour la station agricole T2 (A) et la station de référence B1 (B)

### 3.3 FACTEURS QUI INFLUENCENT LES RÉGIMES D'ÉROSION SELON LES SAISONS

Afin d'identifier les facteurs qui ont une influence sur le pouvoir érosif des cours d'eau, des matrices de corrélation furent produites. Celles-ci mettent en relation les caractéristiques des bassins versants avec les pentes des SRC. Les corrélations furent calculées pour (1) les périodes de fonte, (2) les autres périodes de l'année et (3) une année complète. Les corrélations significatives à 95 % furent retenues pour obtenir les régressions multiples (Tableaux 3.4 et 3.5). Cette analyse fut réalisée à partir des pentes des SRC des six stations qui furent suivies sur toute l'année (P1, P2, B1, B2, T1, T2).

**Tableau 3.4** Matrice de corrélation entre les variables physiques des bassins versants et les pentes des *sediment rating curves* pour les événements de fonte, les autres périodes et pour l'année complète (seuils de signification :  $a = 0,01$  ;  $b = 0,05$ )

	SRC Fonte N= 6	SRC Autre N=6	SRC Annuel N= 6
<b>Hydrographie et physiographie</b>			
A	<b>0.87 a</b>	0.35	0.51
LH	0.72	0.22	0.36
DDH	-0.51	-0.59	-0.61
STR	<b>0.81 b</b>	0.34	0.48
<b>Sédimentologie</b>			
G2mm	-0.20	-0.48	-0.48
G1mm	-0.31	-0.22	-0.30
G500µm	-0.17	0.41	0.27
G250µm	0.10	<b>0.85 b</b>	0.73
G90µm	0.24	-0.07	0.03
G44µm	-0.03	-0.64	-0.52
GM44µm	-0.09	-0.75	-0.64
<b>Morphologie du cours d'eau</b>			
PML	<b>0.82 b</b>	<b>0.85 b</b>	<b>0.91 a</b>
PRO0a0.5	<b>-0.89 a</b>	-0.70	<b>-0.80 b</b>
PRO0,5a0.8	0.62	0.20	0.30
PRO+0.8	0.37	0.69	0.68
LML	0.55	0.26	0.36
LAR0a2	-0.61	-0.56	-0.63
LAR2a4	0.57	0.64	0.68
LAR+4	0.45	0.06	0.17
PMT	-0.58	-0.05	-0.17
PTA0a10	0.54	0.12	0.22
PTA10a20	<b>-0.82 b</b>	-0.40	-0.55
PTA+20	<b>0.78 b</b>	0.50	0.64
LMT	0.41	-0.10	0.02
LTA0a5	0.05	-0.54	-0.46
LTA5a15	-0.27	0.34	0.24
LTA+15	0.54	<b>0.86 b</b>	<b>0.87 b</b>
RAVIN	0.56	0.71	0.75



**Tableau 3.5** Matrice de corrélation entre les variables anthropiques des bassins versants agricoles et les pentes des *sediment rating curves* pour les événements de fonte, les autres périodes et pour l'année complète (seuils de signification :  $a = 0,01$  ;  $b = 0,05$ )

	SRC Fonte N = 6	SRC Autre N = 6	SRC Annuel N = 6
<b>Réseau de drainage</b>			
DS	0.44	0.64	0.65
LDS	0.72	<b>0.84 b</b>	<b>0.88 a</b>
<b>Utilisation du territoire</b>			
AC	<b>0.78 b</b>	0.60	0.71
AF	-0.76	-0.49	-0.62
<b>Pratiques culturelles</b>			
CM	0.20	0.54	0.48
CC	-0.49	-0.49	-0.53
CF	0.54	0.27	0.38
CLM	0.17	0.62	0.55
CLC	-0.60	-0.59	-0.64
CLF	0.47	0.70	0.72
CLFOR	-0.06	-0.64	-0.58
TDS_C	-0.51	-0.33	-0.42
TDS_D	0.52	0.17	0.29
RBR3	-0.58	-0.05	-0.18

### 3.3.1 Périodes de fonte

En ce qui concerne les pentes des SRC en période de fonte, sept variables y sont corrélées de façons significatives. Les variables retenues pour la régression multiple sont principalement liées à la morphologie du cours d'eau, soit la profondeur moyenne du lit majeur (PML) ( $r = 0,82$ ), le pourcentage de la profondeur du lit majeur comprise entre 0 et 0,5 mètres (PRO0a0,5) ( $r = -0,89$ ), le pourcentage de la pente des talus comprise entre 10,01 et 20 degrés (PTA10a20) ( $r = -0,82$ ) et le pourcentage de la pente des talus supérieur à 20,01 degrés (PTA+20) ( $r = 0,78$ ). Des variables liées à la physiographie et l'hydrographie du bassin versant sont également significatives, soit l'aire du bassin versant (A) ( $r = 0,87$ ), l'ordre de Strahler (STR) ( $r = 0,81$ ) et le pourcentage du bassin versant en culture (AC) ( $r = 0,78$ ) (Tableaux 3.4 et 3.5).

La régression multiple réalisée à partir de ces variables a un  $R^2$  ajusté de 0,94 ( $p \leq 0,05$ ). Les variables retenues sont le pourcentage des pentes de talus comprises entre 10,01 et 20 degrés (PTA10a20) (coefficient négatif) et le pourcentage des données de profondeur du lit majeur comprises entre 0 et 0,5 mètres (PRO0a0,5) par bassin versant (coefficient négatif) (Tableau 3.6). La première est fortement corrélée avec le pourcentage du bassin versant en culture (AC) ( $r = -0,94$ ) ainsi que le pourcentage des données de pente de talus supérieur à 20,01 degrés (PTA+20) ( $r = -0,85$ ). La deuxième est fortement corrélée avec la profondeur moyenne des données du lit majeur (PML) ( $-0,90$ ). Mentionnons que la profondeur moyenne du cours d'eau et le pourcentage de la pente des talus supérieur à 20,01 degré sont deux variables fortement corrélées avec le ravinement des berges (voir l'annexe B).

### 3.3.2 Période estivale et début de l'automne

Pour la période estivale et le début de l'automne, quatre variables sont corrélées de façon significative avec les pentes des SRC, soit le pourcentage de l'échantillon de sédiment ayant une granulométrie de 250  $\mu\text{m}$  dans le lit du cours d'eau à l'embouchure (G250 $\mu\text{m}$ ) ( $r = 0,85$ ), la profondeur moyenne du lit majeur du cours d'eau (PML) ( $r = 0,85$ ), le pourcentage de la longueur des talus supérieur à 15,01 mètres (LTA+15) ( $r = 0,86$ ) et la longueur des fossés de drainage de surface (LDS) ( $r = 0,84$ ) (Tableaux 3.4 et 3.5). La régression multiple générée à partir de ces variables a un  $R^2$  ajusté de 0,67 et ne retient qu'une seule variable, soit le pourcentage des données de longueur de pente de talus supérieur à 15,01 mètres (LTA+15) (coefficient positif) (Tableau 3.6). Cette variable est fortement corrélée à la longueur des fossés de drainage (LDS) ( $r = 0,80$ ), au pourcentage de l'échantillon de sédiment ayant une granulométrie  $\geq 2$  mm dans le lit du cours d'eau à la station d'échantillonnage (G2mm) ( $r = -0,82$ ) et au pourcentage de l'échantillon de sédiment ayant une granulométrie de moins de 44  $\mu\text{m}$  dans le lit du cours d'eau à la station d'échantillonnage (GM44 $\mu\text{m}$ ) ( $r = -0,79$ ) (voir l'annexe B). La pente de ce modèle n'est toutefois pas significative (Tableau 3.6).

### 3.3.3 Annuel

Pour les pentes des SRC annuelles, quatre variables y sont corrélées de façon significative, soit la profondeur moyenne du lit majeur du cours d'eau (PML) ( $r = 0,91$ ), le pourcentage de la profondeur du lit majeur comprise entre 0 et 0,5 mètres (PRO0a0,5) ( $r = -0,80$ ), le pourcentage de la longueur des talus supérieur à 15,01 mètres (PTA+15) ( $r = 0,87$ ) et la longueur des fossés de drainage de surface (LDS) ( $r = 0,88$ ) (Tableau 3.4 et 3.5).

La régression multiple générée à partir de ces variables a un  $R^2$  ajusté de 0,96 et les variables retenues sont le pourcentage des données de longueur de pente de talus supérieur à 15,01 mètres (PTA+15) (coefficient positif) et la profondeur moyenne des données du lit majeur (PML) (coefficient positif) (Tableau 3.6). La première est fortement corrélée avec la longueur des fossés de drainage (LDS) ( $r = 0,80$ ) et la deuxième est fortement corrélée avec le pourcentage des données de profondeur du lit majeur comprises entre 0 et 0,5 mètres par bassin versant (PRO0a0,5) (- 0,90) (voir l'annexe B).

**Tableau 3.6** Coefficients des régressions multiples produites pour la pente des *sediment rating curves* en périodes de fonte, à l'été et à l'automne et pour l'année complète

	Coefficient	Erreur standard	Tolérance	Probabilité	$R^2$	Erreur des estimées
<b>Période de fonte</b>					0,94	0,11
Constante	1,631	0,115	14,21	0,00		
PTA10a20	-0,007	0,002	-3,71	0,03		
PRO0a0,5	-0,010	0,002	-4,86	0,02		
<b>Été et automne</b>					0,67	0,37
Constante	0,094	0,205	0,457	0,671		
LTA+15	0,074	0,022	3,329	0,029		
<b>Année</b>					0,96	0,11
Constante	-0,875	0,195	-4,484	0,021		
LTA+15	0,037	0,008	4,418	0,022		
PML	2,087	0,385	5,426	0,012		

### 3.4 OBJECTIFS DE RESTAURATION

Parmi les stations de référence, seule la station B1 a été suivie durant les périodes de fonte. Pour cette raison, afin de considérer l'ensemble des stations de

référence, l'analyse pour déterminer les objectifs de restauration n'a pu être effectuée que pour la période estivale et au début de l'automne.

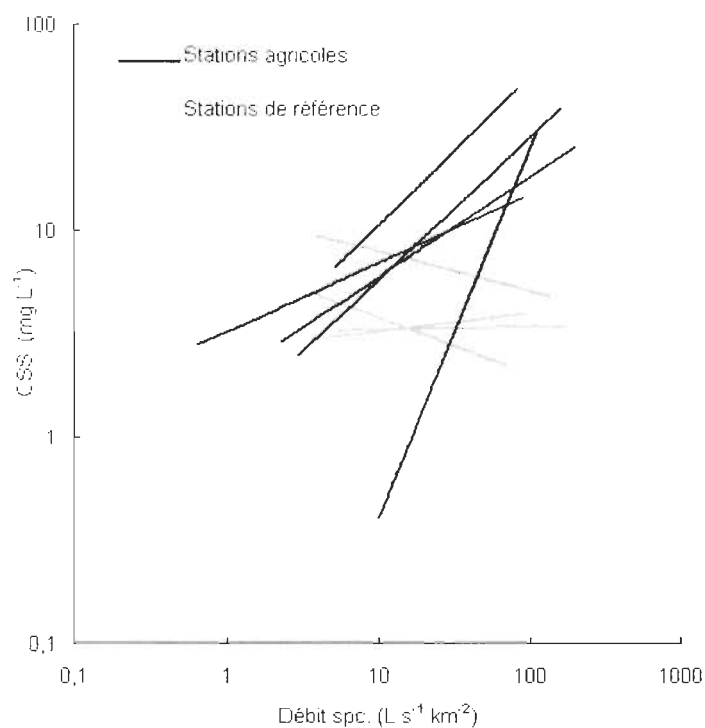
#### 3.4.1. Variabilité des régimes d'érosion entre les bassins versants agricoles et les bassins versants de référence.

Le tableau 3.7 présente les résultats en ce qui concerne débits moyens spécifiques, aux charges sédimentaires spécifiques et aux concentrations de sédiments en suspension (CSS) moyennes des stations agricoles et des stations de référence pour la période estivale et le début de l'automne 2006. Pour cette période, il n'y a pas de différence marquée entre les débits moyens spécifiques des stations agricoles et des stations de référence. Les charges sédimentaires spécifiques observées aux stations agricoles varient entre 2,47 et 9,77 T km<sup>-2</sup> alors que celles observées aux stations de référence varient entre 0,29 et 5,74 T km<sup>-2</sup>. En été et au début de l'automne, les stations de référence sont caractérisées par des CSS moyennes beaucoup plus faibles que les stations agricoles. Aux stations agricoles, celles-ci varient entre 6,58 et 17,39 mg L<sup>-1</sup> alors qu'aux stations de référence elles varient entre 3,80 et 5,99 mg L<sup>-1</sup>.

**Tableau 3.7** Débits moyens spécifiques, charges sédimentaires spécifiques et concentrations moyennes des sédiments en suspension des stations agricoles et des stations de référence pour la période estivale et le début de l'automne 2006

	Débit moyen spécifique (L s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )	Charge sédimentaire spécifique (T km <sup>-2</sup> )	CSS moyenne (mg L <sup>-1</sup> )
<b>Stations agricoles</b>			
P1 (N = 22)	22,60	3,75	17,39
P2 (N = 18)	17,89	2,56	11,68
B2 (N = 22)	32,76	7,55	14,94
T1 (N = 22)	37,83	2,47	6,58
T2 (N = 22)	58,46	9,77	15,98
<b>Stations de référence</b>			
B1 (N = 16)	48,66	5,74	5,99
P-ref (N = 20)	17,66	0,66	5,23
B-ref (N = 20)	19,25	0,29	4,29
T-ref (N = 20)	56,12	3,28	3,80

La figure 3.4 illustre les SRC des stations agricoles et des stations de référence en été et au début de l'automne 2006. Les SRC des stations agricoles sont caractérisées par des pentes très prononcées, ce qui traduit une augmentation rapide des CSS lorsqu'il y a une petite augmentation du débit. De façon contraire, les pentes des SRC des stations de référence sont faibles voir négatives. Pour ces stations, une augmentation du débit provoque un effet de dilution des sédiments en suspension dans le cours d'eau, et non une augmentation de la concentration. Ainsi, pour les stations de référence, il y a peu d'érosion par ruissellement durant cette période.

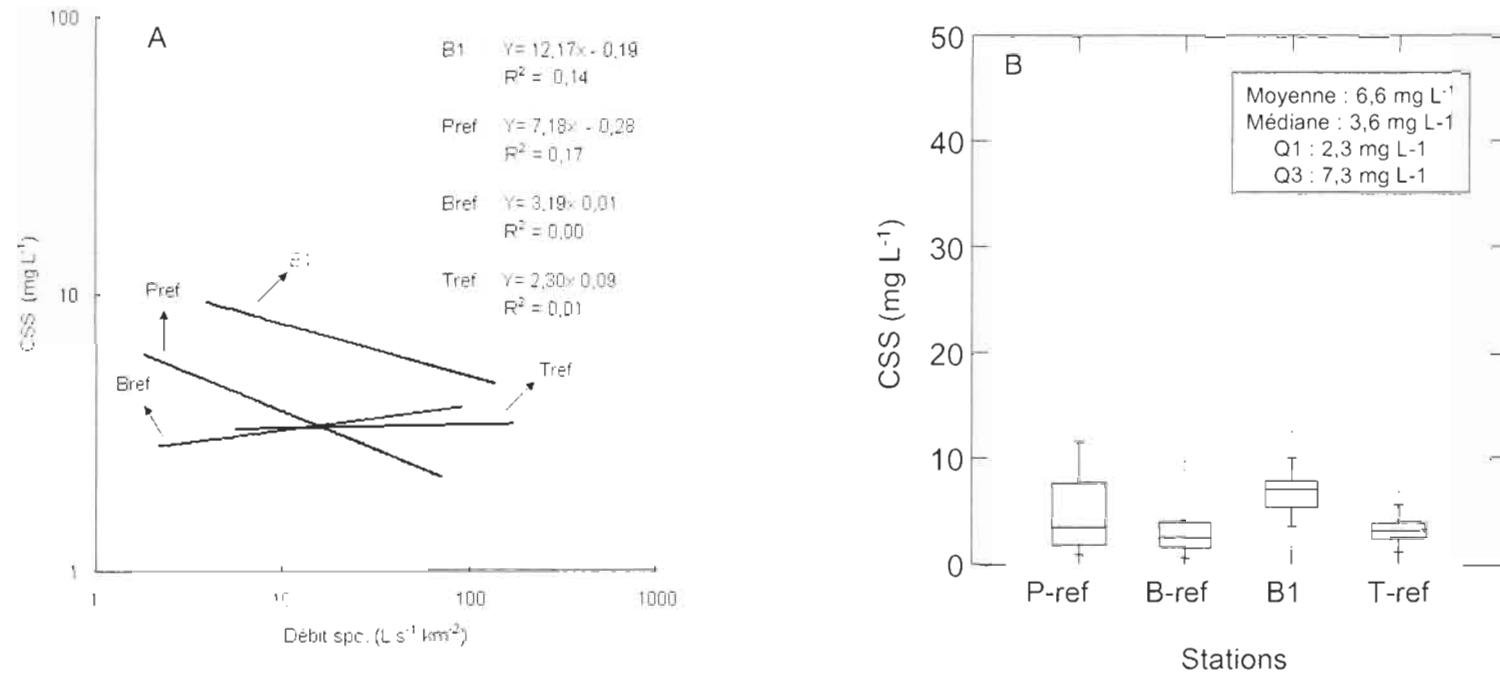


**Figure 3.4** *Sediment rating curves* des neuf stations d'échantillonnage pour l'été et le début de l'automne

### 3.4.2. Détermination des objectifs de restauration

La figure 3.5 illustre les SRC ainsi que la distribution des CSS des stations de référence pour la saison estivale et le début de l'automne 2006. Une ANOVA produite sur les CSS des stations de référence démontre qu'il n'y pas de différences significatives entre ces stations (Figure 3.5B,  $p \leq 0,05$ ). Il ne semble donc pas nécessaire de déterminer des objectifs de restauration spécifiques à chacune des fermes (Pitet, Bédard et Trudel). Ainsi, pour la région agricole étudiée, une médiane de  $3,6 \text{ mg L}^{-1}$  est déterminée comme concentration de sédiments en suspension de référence, avec un intervalle de  $2,3 \text{ mg L}^{-1}$  (Q1) à  $7,3 \text{ mg L}^{-1}$  (Q3). En ce qui a trait aux SRC des stations agricoles, l'objectif de restauration est de diminuer la pente pour en arriver à une ligne de régression qui se rapproche de la pente des SRC des stations de référence.





**Figure 3.5** A. *Sediment rating curves* des stations de référence pour l'été et le début automne  
 B. Distribution des concentrations de sédiments en suspension des stations de référence pour l'été et le début automne

## CHAPITRE IV

### DISCUSSION

L'érosion hydrique découle de processus complexes dont il est difficile de saisir toutes les subtilités. Bien que les résultats obtenus dans le cadre de notre étude ne prétendent pas expliquer de façon détaillée les mécanismes propres à l'érosion hydrique, ils permettent de dégager certaines tendances qui répondent à nos questions de recherche. Rappelons que les objectifs spécifiques de cette étude sont de déterminer les facteurs qui influencent les régimes d'érosion pour les différentes saisons de l'année et de cibler des objectifs de restauration pour l'aire d'étude.

#### 4.1 VARIABILITÉ SAISONNIÈRE DES DÉBITS ET DES RÉGIMES D'ÉROSION

Nos résultats permettent d'affirmer que pour les bassins versants agricoles, il y a une variabilité saisonnière en ce qui a trait aux débits et aux régimes d'érosion. Les débits moyens spécifiques mesurés aux stations agricoles sont de 2 à 3 fois plus élevés durant les périodes de fonte que durant le reste de l'année. Les concentrations de sédiments en suspension (CSS) moyennes sont également plus élevées au cours des événements de fonte. De plus, l'analyse de nos résultats démontre que 40 à 75 % de la charge sédimentaire spécifique annuelle est produite lors de ces conditions. En ce qui a trait aux *sediment rating curves* (SRC), pour la plupart des bassins agricoles (P1, P2, B2, T2), on observe que les pentes sont plus abruptes et que la relation entre les débits et les CSS est beaucoup plus forte ( $R^2$  plus élevé) pour les événements de fonte.

Suite à l'analyse des résultats, nous constatons que les conditions printanières et les événements de fontes des neiges qui surviennent à la fin de l'automne mènent à des épisodes d'érosion intenses. Ces conclusions sont fréquemment énoncées dans la littérature et assez bien documentées. Selon une étude réalisée par Boughton *et al.* (1997) sur l'érosion dans le bassin versant du lac Tahoe (Nevada), les plus grandes charges sédimentaires furent observées durant la période de fonte des neiges. Concernant la même région d'étude, Leonard *et al.* (1979) affirme que les plus grandes pertes de sédiments au cours d'eau surviennent sous des conditions de forts ruissellements, entre autres, au cours des périodes de fonte des neiges. Plusieurs études viennent alimenter la compréhension des mécanismes qui se produisent lors de ces conditions et qui, en l'occurrence, favorisent singulièrement les épisodes d'érosion extrême. De prime abord, c'est l'augmentation de la température de l'air qui engendre la fonte d'un couvert de neige. Cette fonte amène de grande quantité d'eau qui se dirige vers les cours d'eau (ruissellement) et qui engendre une augmentation soudaine et importante des débits. Plusieurs auteurs soutiennent que les changements édaphiques provoqués par les conditions de fonte favorisent particulièrement les processus d'érosion (Oygarden, 2003 : Lentz *et al.*, 1993 ; Kirby et Mehuys, 1987). Par exemple, une étude réalisée par Kirby et Mehuys (1987) démontre que les sols partiellement gelés sont beaucoup plus susceptibles à l'érosion que les sols gelés (hiver) et les sols non gelés (été). De plus, certains auteurs affirment que les conditions de fonte peuvent favoriser la saturation du sol et ainsi augmenter les risques d'érosion. Selon Oygarden (2003), en période de fonte, les couches de sol gelées en profondeur agissent telles des substrats imperméables et mènent à la saturation des couches de sols supérieures. Celles-ci sont alors plus susceptibles à l'érosion. De surcroît, Higgins *et al.* (1990) affirme que lorsque l'infiltration de l'eau est bloquée par les couches de sols gelées en profondeur, un ruissellement latéral dans les couches supérieures peut survenir et faciliter l'érosion. Dans un autre ordre d'idées, plusieurs auteurs affirment que les changements saisonniers de la végétation ont une influence importante sur les régimes d'érosion (Swiechowicz, 2002 : Steegen

*et al.*, 2000 ; Van Dijk et Kwaad, 1996 ; Klein, 1984 ; Arnborg *et al.*, 1967 ; Hall, 1967). Selon Steegen *et al.* (2000), la croissance de la couverture végétale pendant l'été mène à une réduction des sources de sédiments provenant du champ et engendre une dilution des CSS dans les cours d'eau. De façon similaire, selon Lecce *et al.*, (2006), la croissance des cultures et de la végétation sur les berges durant l'été aide à réduire l'érosion puisque la végétation agit comme un filtre à sédiments. Également, de Vente *et al.* (2005) rapportent que la végétation protège le sol contre l'érosion et a une influence bénéfique sur la structure du sol et sa capacité d'infiltration. De façon contraire, pendant les périodes de fontes, la couverture végétale dans les champs est au minimum et les berges sont à nues. Une étude réalisée par Lecce *et al.* (2006) démontre qu'après la récolte des cultures qui s'effectue à la fin de l'automne, les conditions sont particulièrement favorables à l'érosion jusqu'au printemps.

#### 4.2 LES FACTEURS QUI INFLUENCENT LES RÉGIMES D'ÉROSION EN PÉRIODES DE FONTE

Bien que nos résultats soient basés sur un échantillonnage restreint (6 bassins versants), ils expriment des tendances qui méritent d'être considérées quant aux facteurs qui influencent les régimes d'érosion en période de fonte.

Parmi les 42 facteurs caractérisés sur le territoire, sept sont corrélés à un seuil de signification  $\leq 0.05$  avec le pouvoir érosif des bassins versants agricoles en période de fonte. Ils sont, pour la plupart, reliés à la morphologie du cours d'eau (profondeur du cours d'eau, pente de talus), à l'hydrographie et à la physiographie du bassin versant (ordre de Strahler, aire du bassin versant) ainsi qu'à l'utilisation du territoire (pourcentage du bassin versant en culture).

#### 4.2.1 Morphologie du cours d'eau

La pente des SRC en période de fonte augmente avec la profondeur du lit majeur du cours d'eau. Une étude réalisée par Yang *et al.* (2007) arrive à la même conclusion. Selon cette étude, la forte corrélation entre le pouvoir érosif et la profondeur du cours d'eau peut être expliquée par le gradient de pente de la rivière. Le gradient de pente de la rivière consiste en la différence d'altitude entre le point amont et le point aval d'un cours d'eau, sur la distance parcourue par celui-ci. Yang *et al.*, (2007) affirment qu'un cours d'eau très encaissé (profond) est le résultat d'un gradient de pente élevé tandis qu'un cours d'eau d'une morphologie plus évasée fait référence à un gradient de pente plus faible. Dans un même ordre d'idées, selon Verstraeten et Poesen (2001), les cours d'eau qui sont caractérisés par un gradient de pente élevé sont dans une phase jeune de leur cycle d'érosion et sont sujets à des taux d'érosion élevés. Durant leur stade plus avancé, les cours d'eau évoluent dans une dynamique plus équilibrée qui fait en sorte que leur gradient de pente et leur profondeur diminuent alors que leur largeur augmente. À ce stade, leur énergie érosive s'affaiblit ce qui donne lieu à des pertes de sédiments moins élevées (Strahler, 1952).

Selon notre étude, pendant les conditions de fonte, la pente des SRC est également corrélée de façon positive avec les fortes pentes de talus ( $\geq 20,01$  degrés). Plusieurs études soutiennent que l'érosion s'intensifie avec l'augmentation de l'angle de la pente (Yair et Raz-Yassif, 2004 ; Verstraten et Poesen, 2001). Selon Valentin *et al.*, (2005), plus les pentes sont accidentées, plus la vitesse de ruissellement augmente, ce qui intensifie l'énergie érosive et provoque de plus grandes pertes de sédiments. Comme les périodes de fonte des neiges engendrent de grandes quantités d'eau qui ruissellent sur les talus des cours d'eau, l'inclinaison de la pente est un facteur d'autant plus critique sous ces conditions. En outre, certains auteurs

soutiennent qu'en raison du pouvoir accrue d'incision provoquer par l'accélération du ruissellement, les pentes abruptes sont particulièrement propices à l'initiation du processus de ravinement (Valentin *et al.*, 2005 ; Vanwalleghe *et al.*, 2005).

#### 4.2.2 Hydrographie et physiographie

Selon nos résultats, la pente des SRC en période de fonte augmente avec l'aire du bassin versant et l'ordre Strahler. Mentionnons que ces deux facteurs sont fortement corrélés entre eux ( $r = 0,93$ ). Toutefois, certaines études révèlent que les pertes de sédiments diminuent avec l'augmentation de l'aire des bassins versants. Selon une étude de Verstraeten et Poesen (2001), l'augmentation de la superficie du bassin versant est généralement accompagnée par l'accroissement de la fraction de sites de déposition dans le bassin versant. Puisque les sites caractérisés par de faibles pentes occupent de plus grandes superficies dans les grands bassins versants, il en résulte une diminution des sources de sédiments. Mentionnons que les conclusions tirées de cette recherche sont basées sur l'étude de bassins versants dont la superficie varie de 7 à 4 873 ha. Notre étude concerne uniquement des petits bassins versants dont la taille varie entre 12 et 176 ha. De fait, l'échelle considérée pour notre étude est différente de celle de Verstraeten et Poesen (2001). Ces auteurs avancent que les résultats de leur étude ne peuvent pas être comparés avec des études où les bassins versants étudiés ne sont pas de la même superficie et soulignent que davantage d'études devraient être réalisées sur des petits bassins versants. De plus, Verstraeten et Poesen (2001) soutiennent que la corrélation négative entre la superficie et les pertes de sédiments dépend singulièrement des caractéristiques géomorphologiques locales des bassins versants. Il est donc possible que contrairement à l'étude de Verstraeten et Poesen (2001), les zones de dépositions et les pentes faibles n'augmentent pas avec l'augmentation de l'aire des bassins versants que nous étudions (voir l'annexe B).

#### 4.2.3 Utilisation du territoire

La pente des SRC en périodes de fonte augmente avec l'augmentation du pourcentage du bassin versant en culture. Il est généralement admis que l'érosion diminue avec l'augmentation du couvert forestier sur un bassin versant (de Vente *et al.*, 2005 ; Gomez *et al.*, 2003 ; Li *et al.*, 1991 ; Arnold *et al.*, 1989). La portion forestière sur un territoire permet d'améliorer la structure du sol et sa capacité d'infiltration, de réduire les débits de pointe et de fournir une résistance au ruissellement. Pendant les périodes de fonte, l'étendue de la portion agricole dans un bassin versant a une influence particulière sur l'érosion. Après les récoltes de l'automne jusqu'à la fin du printemps, la couverture végétale sur les champs est à son plus bas et les terres agricoles sont très vulnérables à l'érosion (Lecce *et al.*, 2006 ; Steegen *et al.*, 2000). C'est à ce moment que le ruissellement intense issu de la fonte des neiges, sur les terres agricoles presque à nues, cause des pertes importantes de sol.

#### 4.2.4 Le ravinement : un processus d'érosion qui prédomine en conditions de fonte ?

Parmi les variables qui sont corrélées à un seuil de signification  $\leq 0.05$  avec le pouvoir érosif des bassins versants agricoles, toutes saisons confondues (fonte, autres que fonte, annuel), deux sont corrélées avec le ravinement. Ces deux variables sont la profondeur moyenne du cours d'eau (0,79) ainsi que le pourcentage de la pente des talus supérieur à 20,01 degré (0,82). Selon nos résultats, ces deux variables s'avèrent être des facteurs morphologiques qui ont une influence sur le pouvoir érosif pendant les événements de fonte. Bien que notre étude ne permette pas de tirer de conclusions claires en ce qui a trait à la part du processus de ravinement pendant les épisodes d'érosion qui se produisent au cours des périodes de fonte, elle comporte des indices qui justifient une réflexion à ce sujet.

Dans la littérature, plusieurs études tendent à démontrer que durant les périodes de fonte, le processus de ravinement est plus présent que l'érosion en nappe et en rigole (Oygarden, 2003 ; Poesen *et al.*, 2003 ; Vandaele et Poesen 1995 ; Spomer et Hjelmfeldt, 1983). Selon Oygarden (2003), lors d'événements de ruissellement extrêmes liés à la fonte des neiges, le type d'érosion qui domine peut changer passant de l'érosion en nappe à l'érosion en ravin. De façon similaire, selon Poesen *et al.* (2003), les régions continentales caractérisées par des variations saisonnières considérables sont sujettes à une variabilité temporelle des processus d'érosion. Selon le même auteur, au printemps, un ratio élevé de l'érosion par le ravinement serait causé par le ruissellement concentré dû à la fonte des neiges alors qu'il y aurait peu d'érosion en nappe puisque l'impact des gouttes de pluie sur le sol est limité par la couverture de neige. D'autre part, le ratio de l'érosion en nappe et en rigole serait plus élevé que celui du ravinement au cours de l'été. Également, une étude de Spomer et Hjelmfeldt (1983) démontre que l'érosion en ravin est un processus accentué par le ruissellement de fonte des neiges, mais qui n'est pas prédominant durant toute l'année.

#### 4.3 LES FACTEURS QUI INFLUENCENT LES RÉGIMES D'ÉROSION À L'ÉTÉ ET AU DÉBUT DE L'AUTOMNE

Les facteurs qui influencent le pouvoir érosif des bassins versants à l'étude au cours de la période estivale et le début de l'automne sont en partie différents de ceux qui ont une influence sur le pouvoir érosif en conditions de fonte. En somme, 4 variables sont corrélées à un seuil de signification  $\leq 0.05$  avec le pouvoir érosif des bassins versants lors des conditions autres que fonte. Parmi celles-ci, deux relèvent de la morphologie du cours d'eau (profondeur du cours d'eau et longueur de talus), une de la granulométrie du lit du cours d'eau à l'embouchure (pourcentage de



l'échantillon de sédiment ayant une granulométrie de 250  $\mu\text{m}$ ) et une autre du réseau de drainage (fossés de drainage agricole).

#### 4.3.1 Morphologie du cours d'eau

La pente des SRC en période estivale et au début de l'automne augmente avec la profondeur moyenne du lit majeur du cours. La même situation est observée pour les pentes des SRC au cours des événements de fonte. De même façon que pour les conditions de fonte, l'influence de la profondeur du cours d'eau en été et au début de l'automne peut être expliquée par le gradient de pente des cours d'eau. Rappelons que selon certaines études, la profondeur d'un cours d'eau augmente avec le gradient de pente d'une rivière et que l'énergie érosive de celle-ci sera d'autant plus forte lorsque le gradient de pente est élevé (Yang *et al.*, 2007 ; Verstraeten et Poesen, 2001 ; Strahler, 1952).

Pendant la période estivale et le début de l'automne, les pentes des SRC sont également corrélées avec les pentes de talus qui sont les plus longues ( $\geq 15$  mètres). Plusieurs études soutiennent que l'érosion s'intensifie avec l'augmentation de la longueur de la pente (Rejman et Brodowski 2005 ; Millward et Mersey, 1999 ; Renard *et al.*, 1997 ; Desmet et Govers, 1996 ; Wischmeier et Smith, 1978). Selon une étude aux champs réalisée par Rejman et Brodowski (2005), les pertes de sol augmentent de façon linéaire avec l'augmentation de la longueur de pente. Également selon cette étude, la largeur, la profondeur ainsi que la quantité de rigoles dans un champ augmentent avec la longueur de la pente du talus. Ainsi, l'aire contributive du bassin versant s'agrandit et engendre de plus grandes pertes de sol en provenance des terres agricoles.

#### 4.3.2 Granulométrie du lit du cours d'eau à l'embouchure

Les pentes des SRC en été et au début de l'automne augmentent avec l'augmentation du pourcentage de l'échantillon de sédiment ayant une granulométrie de 250  $\mu\text{m}$  dans le lit du cours d'eau à l'embouchure. Mentionnons que ce facteur est corrélé de façon négative avec les sédiments très fins ( $\text{GM}_{44\mu\text{m}}$  : - 0,92). Bien que plusieurs études traitent des relations entre la granulométrie des particules et les processus d'érosion, les résultats de notre étude ne permettent pas de formuler de conclusions à ce sujet. D'abord, l'échantillonnage des sédiments dans le lit des cours d'eau à l'embouchure n'a été réalisé que l'été. De ce fait, on ne peut pas mettre en lumière les changements temporels de la granulométrie des sédiments déposés. De plus, l'échantillonnage a été réalisé sur les sédiments déposés dans le lit du cours d'eau. Les résultats auraient été plus révélateurs si l'analyse granulométrique avait été faite sur les sédiments en suspensions et pendant toute l'année. De cette façon, nous aurions pu voir s'il se produit une érosion sélective des particules de sol en fonction des saisons. D'ailleurs, plusieurs chercheurs se sont penchés sur la question (Souchère *et al.*, 1998 ; Ongley *et al.*, 1981 ; Svortsov, 1955 ; Hjølstrom, 1935). Dans le cadre d'une étude réalisée en Ontario (Canada), Ongley *et al.* (1981) rapportent que les sédiments en suspension sont plus grossiers durant le printemps que durant l'été et l'automne. Selon eux, ces changements sont le résultat d'une plus grande contribution des particules provenant du chenal durant le printemps et d'une plus grande contribution provenant du bassin versant durant l'été et l'automne. Des conclusions similaires sont rapportées par Souchère *et al.* (1998). Une autre étude révèle que l'érosion d'un matériel cohésif de texture très fine (argile) nécessite des débits élevés (Hjølstrom, 1935). De fait, les événements de ruissellement extrême seraient favorables à la mise en suspension de l'argile. Selon une étude de Svortsov (1955), la granulométrie des sédiments en suspension est sujette à une variabilité temporelle évidente. Les résultats de cette étude démontrent qu'au printemps, on retrouvait une

plus grande proportion de particules grossières, tandis que de juin à octobre, les sédiments en suspension étaient dominés par une texture intermédiaire.

#### 4.3.3 Drainage

La pente des SRC au cours de la période estivale et le début de l'automne augmente avec la longueur des fossés de drainage agricole. Selon Ludwig *et al.* (1995), dans les cas où l'inclinaison de la pente du terrain joue un rôle moins important en ce qui concerne les chemins préférentiels d'écoulement, l'érosion peut être davantage influencée par des facteurs de drainage anthropiques comme les fossés de drainage agricole, les sillons et l'orientation du travail du sol ainsi que les chemins de terres. En outre, dans le cadre d'une étude basée sur l'observation d'une cinquantaine de parcelles agricoles, Souchère *et al.*, (1998) démontrent que la direction du ruissellement de surface sur les champs se divise en deux groupes distincts, soit celles qui suivent l'orientation de la pente et celles qui suivent le drainage anthropique. Suite à l'examen de nos résultats et à l'analyse de la littérature, nous pouvons supposer que l'écoulement préférentiel du ruissellement qui cause l'érosion diffère selon les saisons. Ainsi, le ruissellement semble être conditionné par la pente des talus en conditions de fonte tandis qu'il semble être davantage influencé par les fossés de drainage agricole en période estivale et au début de l'automne.

#### 4.4 LES FACTEURS QUI INFLUENCENT LES RÉGIMES D'ÉROSION À L'ÉCHELLE ANNUELLE

À l'échelle annuelle, les variables (4) qui sont corrélées avec le pouvoir érosif des bassins versants s'avèrent être une combinaison des facteurs retenus pour les

conditions de fonte et pour la période estivale et le début de l'automne. La plupart sont des facteurs liés à la morphologie du cours d'eau (profondeur du lit du cours d'eau, longueur de talus) et l'un est un facteur de réseau de drainage (fossés de drainage agricole). Le rôle de ces facteurs en ce qui a trait aux régimes d'érosion est discuté dans les pages précédentes.

À la lumière de nos résultats, nous pouvons affirmer qu'il existe une distinction entre les facteurs qui influencent les régimes d'érosion en période de fonte et ceux qui conditionnent les régimes d'érosion en période estivale et à la fin de l'automne. Par contre, la profondeur du lit du cours d'eau est un facteur qui semble jouer un rôle constant, tout au long de l'année, dans les régimes d'érosion.

#### 4.4. LES OBJECTIFS DE RESTAURATION

Puisque notre recherche s'inscrit dans un projet de restauration de cours d'eau en milieu agricole, la détermination d'objectifs de restauration pour la zone étudiée est une question à laquelle nous nous sommes particulièrement intéressés. Suite à l'analyse des résultats, une CSS médiane de  $3,6 \text{ mg L}^{-1}$  avec un intervalle de  $2,3 \text{ mg L}^{-1}$  (Q1) à  $7,3 \text{ mg L}^{-1}$  (Q3) fut déterminée comme objectif de restauration. Rappelons que l'approche que nous avons privilégiée est la méthode *least disturbed condition* (LDC) qui consiste en un état qui reflète les meilleures conditions disponibles dans le paysage concerné. Ainsi, puisque notre étude fut réalisée dans un milieu agricole, nos stations de référence furent positionnées en amont des bassins versants agricoles, là où les activités agricoles sont moins intensives et la proportion du couvert forestier est considérable. Nos résultats révèlent que pour la période estivale et le début de l'automne, il existe une différence entre les régimes d'érosion des bassins versants agricoles et des bassins versants de référence.

Pour cette période de l'année, les concentrations de sédiments en suspension (CSS) sont beaucoup plus élevées pour les bassins agricoles que les bassins de référence. Ces distinctions peuvent être expliquées par l'observation des différences entre les deux groupes de bassins versants en ce qui concerne les caractéristiques liées à l'occupation du territoire et aux pratiques culturales. En général, les bassins versants de référence sont caractérisés par des proportions en forêt supérieures à 60 %. Pour T-ref, la proportion du territoire en couvert forestier atteint 90 %. Dans la littérature, plusieurs études démontrent que le couvert forestier joue un rôle important en ce qui a trait à la réduction de l'érosion (de Vente *et al.*, 2005 ; Gomez *et al.*, 2003 ; Li *et al.*, 1991 ; Arnold *et al.*, 1989). Le couvert forestier a une influence bénéfique sur la structure et la capacité d'infiltration du sol et sur la régularisation des débits. De plus il offre une grande résistance au ruissellement et protège le sol contre l'érosion. Dans un autre ordre d'idées, à l'exception de T-ref, la zone agricole des bassins versants de référence comporte uniquement des cultures de petites interlignes (céréales) et de pleines surfaces (fourrage). Ce type de culture fournit une plus grande couverture végétale au sol que les cultures de grandes interlignes comme le maïs. Selon le CPVQ (2000), le pourcentage de couverture végétale sur le sol a un impact important sur la réduction de l'érosion puisqu'un couvert dense permet de protéger le sol contre l'érosion et offre une résistance au ruissellement. De plus, l'augmentation de la couverture végétale du sol améliore les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (CPVQ, 2000). Le bassin versant B1 se distingue par une large bande riveraine herbacée de part et d'autre du cours d'eau (15 à 25 mètres). Selon Syversen (2005), la largeur de la bande riveraine a une influence importante sur son efficacité. Selon la même étude, un contact suffisant entre le ruissellement et la bande riveraine est important pour observer une diminution de la vitesse du ruissellement et de l'érosion.

Nos résultats permettent également d'affirmer que pour la période estivale et la fin de l'automne, les SRC des stations agricoles sont caractérisées par des pentes

très prononcées tandis que les pentes des SRC des stations de référence sont très faibles voir négatives. Cela indique qu'aux stations de référence, les CSS sont les mêmes peu importe le débit ou qu'il survient un effet de dilution dans le cours d'eau lorsque le débit augmente. En fait, puisque les bassins versants de référence sont caractérisés par un couvert végétal plus dense, il est possible que lorsque les pluies surviennent, la végétation agit en tant que piège à sédiments. De fait, lorsque le ruissellement provoque une augmentation du débit dans le cours d'eau, les CSS restent faibles. Certaines études arrivent aux mêmes conclusions (Lecce *et al.*, 2006 ; Steegen *et al.*, 2000). Par exemple, une étude réalisée par Steegen *et al.* (2000) démontre que l'augmentation du couvert végétal durant l'été réduit la production de sédiments en provenance du champ et mène à une dilution des CSS dans l'eau.

## CHAPITRE V

### CONCLUSION

Bien que les problèmes d'érosion en milieu agricole et leurs conséquences soient bien connues, peu d'études permettent de cibler les caractéristiques qui ont une influence prépondérante sur l'érosion pour les différentes saisons au Québec (fonte des neiges, été). D'autre part, il est assez bien connu que les périodes de fonte des neiges engendrent de grandes quantités de sédiments dans les cours d'eau. Selon notre étude, 40 à 75 % des charges sédimentaires annuelles pour les bassins versants agricoles se produisent pendant les événements de fonte des neiges. Notons que ces événements représentent une courte période du cycle annuel, soit le tiers. Considérant qu'une grande part de la charge sédimentaire est produite sur une courte période de l'année, en l'occurrence les périodes de fonte, il est d'autant plus important de déterminer les facteurs qui influencent l'érosion sous ces conditions. C'est pour cette raison que notre étude s'est particulièrement intéressée à cette question. Dans un autre ordre d'idée, notre étude a également voulu cibler des objectifs de restauration pour la zone d'étude. Depuis 2002, un projet de restauration de cours d'eau en milieu agricole est en place sur le territoire. La détermination d'objectifs de restauration permettra de mesurer la progression et le succès de ce projet en ce qui a trait à la réduction de l'érosion.

Parmi les 42 facteurs anthropiques et physiques caractérisés sur le territoire à l'étude, certains se sont avérés être corrélés de façon significative ( $\leq 0.05$ ) avec le pouvoir érosif des bassins versants. Selon nos résultats, il y a une distinction entre les facteurs qui influencent l'érosion durant les événements de fonte et ceux qui influencent l'érosion durant l'été et le début de l'automne. Seule une variable, la profondeur du cours d'eau, est commune aux deux périodes de l'année. Peu importe

la saison, le pouvoir érosif augmente avec la profondeur du cours d'eau. Des études ont révélé qu'un gradient de pente élevé engendre des cours d'eau profond qui sont plus susceptibles à l'érosion. Également, les cours d'eau plus encaissés seraient dans une phase jeune de leur cycle d'érosion ce qui expliquerait leur plus grande susceptibilité à l'érosion. Ce phénomène est naturel dans la mesure où le cours d'eau tend à atteindre un équilibre qui se traduira par une diminution de son gradient de pente, des pentes de talus plus douces ainsi qu'une morphologie plus large et évasée. Dans le cadre d'un projet de restauration, nous devons conjuguer avec le fait que les cours d'eau encaissés sont « naturellement » plus susceptibles à l'érosion que les autres. Néanmoins, certaines mesures peuvent être entreprises pour ralentir le processus. Notamment, l'implantation de seuils dans le lit du cours d'eau peut contribuer à ralentir la vitesse d'écoulement et ainsi diminuer la vitesse d'encaissement du chenal. La gestion du ruissellement dans le bassin versant peut également contribuer à amoindrir cette problématique. De fait, les mesures visant à régulariser les débits et réduire les pointes de crue des bassins versants peuvent être bénéfiques.

Pendant les périodes de fonte, les portions de cours d'eau caractérisées par de fortes pentes de talus sont particulièrement susceptibles à l'érosion. L'inclinaison accrue de ces zones fournit une énergie érosive particulièrement grande aux importantes quantités d'eau de ruissellement générées par la fonte des neiges. Aux endroits où les pentes sont fortes, l'adoucissement des talus (reprofilage) est une technique qui peut être entreprise. Cependant, le reprofilage des talus en pentes fortes sur la totalité du réseau hydrographique d'un bassin versant représentent des coûts prohibitifs et beaucoup de temps et d'énergie. De fait, sur ces portions du territoire, certaines mesures visant à réduire la vitesse de ruissellement au printemps et à la fin de l'automne peuvent être envisagées. Entre autres, la plantation d'une végétation permanente ou l'implantation de structure visant à retenir ou détourner l'eau en haut du talus sont des méthodes pouvant aider à diminuer l'impact de ce problème.



En période de fonte, le pouvoir érosif augmente avec la proportion du bassin versant en culture. Pendant la fin de l'automne et le printemps, suite à la récolte, la couverture végétale des zones agricoles est au minimum et le sol est parfois à nu. Ces zones sont alors plus vulnérables à l'érosion et le ruissellement important qui résulte de la fonte des neiges y est particulièrement dommageable. Pour palier cette problématique, des mesures visant à réduire la proportion agricole dans le bassin versant peuvent être entreprises (reboisement). En outre, par l'entremise de certaines pratiques culturales de conservation des sols (semis direct, gestion des résidus de culture), il est possible d'augmenter la couverture végétale sur les zones agricoles pendant ces périodes à risques. L'aire du bassin versant ainsi que l'ordre de Strahler sont également des facteurs qui ont une influence sur le pouvoir érosif des bassins versants en période de fonte. Dans les petits bassins versants, plus l'ordre du réseau hydrographique est grand, plus le retrait des sédiments dans le cours d'eau est efficace.

L'été et la fin de l'automne, la longueur des pentes de talus a une influence prépondérante sur le pouvoir érosif. L'aire contributive aux pertes de sol ainsi que l'importance de l'érosion en rigole augmente avec la longueur de la pente des talus. Selon notre étude, le pouvoir érosif des bassins versants agricoles pour la période estivale et la fin de l'automne augmente également avec la longueur des fossés de drainage agricole. Sur un territoire agricole, l'aménagement de fossés de drainage a pour principal objectif de faire évacuer les eaux de ruissellement le plus rapidement possible. De fait, un bassin versant agricole qui contient un important réseau de fossés agricoles sera caractérisé par des débits de pointe plus élevés, ce qui a pour effet d'augmenter l'énergie érosive du bassin versant et l'efficacité du retrait des sédiments dans le cours d'eau.

Bien que notre étude ait permis de mettre en lumière des facteurs qui influencent le pouvoir érosif des bassins versants agricoles pour les différentes

périodes de l'année (fonte et autre), il est possible qu'en raison de certains aspects méthodologiques de l'étude, des caractéristiques du territoire aient été sous-estimées. En effet, certains facteurs que nous nous attendions à voir ressortir comme ayant une influence sur l'érosion n'ont pas été distingués par l'analyse. Entre autres, des caractéristiques liées aux pratiques culturales comme le type de travail du sol, le type de culture et les bandes riveraines sont souvent mentionnés dans la littérature comme ayant une influence sur l'érosion. Il est possible que la taille restreinte de l'échantillon (6 bassins versants) explique que ces variables n'aient pas été retenues par nos analyses.

Sans être au cœur de nos préoccupations initiales, la question de la part du ravinement dans les processus d'érosion s'est révélée comme étant une piste intéressante pour la compréhension de la variabilité temporelle des régimes d'érosion. Notre étude ne permet pas d'émettre de conclusions claires à ce sujet mais nous sommes en mesure d'affirmer que deux facteurs désignés comme ayant une influence sur le pouvoir érosif en période de fonte (profondeur du cours d'eau, pente des talus) sont corrélés de façon significative avec le ravinement. Dans la littérature, certaines études tendent à démontrer que la part des types d'érosion varie en fonction des saisons. En fait, l'érosion en périodes de fonte serait dominée par le processus de ravinement alors que l'érosion en période estivale serait dominée par l'érosion en nappe et en rigole. Départager la part des processus d'érosion dans un bassin versant permettrait de déterminer l'origine des sédiments dans les cours d'eau et de mieux cibler les mesures de conservation des sols à implanter sur le territoire. En ce sens, il serait intéressant d'approfondir nos connaissances sur le sujet.

Pour déterminer les objectifs de restauration, notre étude s'est basée sur les régimes d'érosion propre à des bassins versants caractérisés par une agriculture moins intensive (bassins versants de référence). Les résultats obtenus ont révélé que pour la période estivale et le début de l'automne, l'érosion était beaucoup moins importante

pour ces bassins versants que pour les bassins versants agricoles. Ainsi, une concentration de sédiment en suspension médiane de  $3,6 \text{ mg L}^{-1}$  avec un intervalle de  $2,3 \text{ mg L}^{-1}$  (Q1) à  $7,3 \text{ mg L}^{-1}$  (Q3) est fixée comme objectif de restauration. En outre, suite au projet de restauration, les pentes des *sediment rating curves* des stations agricoles devraient tendre à diminuer. Toutefois, notre étude ne permet pas de fixer d'objectifs de restauration pour les périodes de fonte, ni de comparer les régimes d'érosion des bassins versants agricoles avec les bassins versants de référence sous ces conditions. L'accessibilité réduite aux stations de référence pendant le printemps et la fin de l'automne a fait en sorte qu'aucun suivi n'a été fait au cours de ces périodes.

Somme toute, ce mémoire propose plusieurs pistes de solution en ce qui a trait à la compréhension des régimes d'érosion en milieu agricole. Elle contribue à identifier des facteurs qui influencent le pouvoir érosif des bassins versants et fournit des objectifs de restauration pour la période estivale et au début de l'automne. Par contre, des recherches supplémentaires devront être menées afin de clarifier la part du ravinement dans les processus d'érosion. En outre, il serait intéressant que d'autres études soient réalisées afin de déterminer des objectifs de restauration pour les événements de fonte et de voir les différences entre les régimes d'érosion de fonte des bassins versants agricoles et ceux des bassins versants de référence.

## RÉFÉRENCES

Agriculture Canada (1982) « Une évaluation de la dégradation des terres agricoles au Canada », Direction générale de la recherche, Ottawa, 158 p.

Archibold, O.W., Levesque, L.M.J., de Boer, D.H., Aitken, A.E., et Delanoy, L. (2003) « Gully retreat in a semi urban catchment in Saskatoon, Saskatchewan », *Applied Geography*, 23 : 261– 279.

Arnborg, L., Walker, H.J., et Peippo, J. (1967) « Suspended load in the Colville river, Alaska, 1962 », *Geografiska Annaler*, 49 A : 131-144.

Arnold, J.B., Wall, G., Moore, N., Baldwin, C.S., et Shelton, I.J. (1989) « Fiche technique : L'érosion du sol - Causes et Effets », Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculture et Affaires Rurales, Guelph. 7 p.

Asselman, N.E.M. (1999) « Suspended sediment dynamics in large drainage basin: the river Rhine », *Hydrological Processes*, 13: 1437-1450.

Asselman, N.E.M. (2000) « Fitting and interpretation of sediment rating curves », *Journal of hydrology*, 234: 228-248.

Bailey, R., Norris, C.R.H., et Reynoldson, T.B. (2004) « Bioassessment of Freshwater Ecosystems: Using the Reference Condition Approach », Kluwer Academic Publishers, New York, 184 p.

Boughton, C.J., Rowe, T.G., Allander, K.K., et Robledo, A.R. (1997) « Stream and ground-water monitoring program, Lake Tahoe Basin, Nevada and California », US Geological Survey, Fact Sheet, FS-100-97.

Burkard, M.B., et Kostaschuk, R.A. (1997) « Patterns and controls of gully growth along the shoreline of Lake Huron », *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 : 901–911.

Church, M., et Gilbert, R. (1975) « Proglacial fluvial and lacustrine environments », *In* Jopling A.V., et McDonald, B.C. (Ed.) « Glaciofluvial and Glaciolacustrine Sedimentation », Sedimentation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 23: 40-100.

Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., et Eaton, A.D. (1998) « Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater », American Public Health Association, 20<sup>th</sup> ed, Washington, 1 220 p.

Conseil des productions végétales du Québec inc. (2000) « Guide des pratiques de conservation en grandes cultures », Réalisé en partenariat: Entente auxiliaire Canada-Québec pour un environnement durable en agriculture; CPVQ; FPCCQ; MAPAQ; MENV; ACC., Saint-Hyacinthe, Document en 7 modules et 34 feuillets, 520 p.

Desmet, P.J., et Govers, G. (1996) « A GIS procedure for the automated calculation of USLE LS factor on topographically complex landscape units », *Journal of Soil and Water Conservation*, 51 : 427-433.

De Vente, J., Poesen, J., et Verstraeten, G. (2005) « The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain », *Journal of Hydrology*, 305: 63-86.

Duchemin, M., et Majdoub, R. (2004) « Les bandes végétales filtrantes : de la parcelle au bassin versant », *Vecteur Environnement*, 37: 36-50.

Esteves, M., Descroix, L., Mathys, N., et Lapetite, J.M. (2005) « Soil hydraulic properties in a marly gully catchment (Draix, France) », *Catena*, 63 : 282-298.

Evans, R. (1993) « Extent, frequency and rates of rilling of arable land in localities in England and Wales », *In* Wicherek, S. (Ed.) « Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills », Elsevier, Amsterdam, pp. 177–190.

Federal Interagency Stream Restoration Working Group (2001) « Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices », Federal Interagency Stream Restoration Working Group, USA, pp. 25-65.

Fawcett, R.S., Christensen B.R., et Tierney, D.P. (1994) « The impact of conservation tillage on pesticide runoff into surface water: A review and analysis », *Journal of soil and water conservation*, 49 : 126-135.

••

Garen, D., Woodward, D., et Geter, F. (1999) « A user agency's view of hydrologic, soil erosion and water quality modelling » *Catena*, 37: 277-289.

Gomez, B., Banbury, K., Marden, M., Trustrum, N.A., Peacock, D.H., et Hoskin, P.J. (2003) « Gully erosion and sediment production : Te Weraroa Stream, New Zealand », *Water Resources Research*, 39 : 1187.

.

Hall, D.G.(1967) « The Pattern of Sediment Movement in the river Tyne », *International Association of Scientific Hydrological Publication*, Vol 75, Bern, pp. 117-140.

Higgins, C.G., Hill, B.R., et Lehre, A.K. (1990) « Gully development. with a case study », *In Higgins, C.G., et Caotes, D.R. (Ed.) « Groundwater geomorphology; the role of subsurface water in earth-surface processes and landforms »*, Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 252, pp. 139-155.

Hilborn, D. (1996) « Fiche technique : Lutte contre l'érosion en ravin », Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculture et Affaires Rurales, Guelph, 10 p.

Hjulström, F. (1935) « Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris », *Bulletin of the geological institutions of the University of Uppsala*, 25 :221-527.

Hughes, R.M., Larsen, D.P., et Omernik, J.M. (1986) « Regional reference sites: a method for assessing stream potentials », *Environmental management*, 10 : 629-635.

Hughes, R.M., Whittier, T.R., et Rohm, C.M. (1990) « A regional framework for establishing recovery criteria », *Environmental management*, 14 : 673-683.

Hughes, R.M. (1995) « Defining acceptable biological status by comparing with reference conditions », *In* Davis, W., et Simon, T. (Ed.) « Biological assessment and criteria : tools for water resource planning and decision making for rivers and streams », Lewis, Boca Raton, Florida, Chapter 4, pp. 31-47.

••

Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Herlihy, A.T., Kincaid, T.M., Reynolds, L., et Larsen D.P. (1998) « A process for developing and evaluating indices of fish assemblage integrity » *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55 : 1618-1631.

Huon, S., Bellanger, B., Bonté, P., Podwojewski, P., Girardin, C., Valentin, C., de Rouw, A., Velasquez, F., Bricquet, J.P., et Mariotti, A. (2005) « Monitoring soil organic carbon erosion with isotopic tracers, two case studies on cultivated tropical catchments with steep slopes (Laos, Venezuela) », *In* Roose, E., et Stewart, B.A. « Soil Erosion and Carbon Dynamics », CRC Press, Boca Raton, Florida, Chapitre 20, pp. 301-322

Kirby, P.C., et Mehuys, G.R. (1987) « Seasonal variation of soil erodibilities in southwestern Quebec », *Journal of Soil and Water Conservation*, 42 : 211-215.

Klein, M. (1984) « Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms: Holbeck catchment; Yorkshire, England », *Catena*, 11 : 251-257.

Krause, A.K., Franks, S.W., Kalma, J.D., Loughran, R.J., et Rowan, J.S. (2003) « Multi parameter fingerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia », *Catena*, 53 : 327– 348.

Laflen, J.M. (1985) « Effect of tillage systems on concentrated flow erosion », *In* Pla, I.S. (Ed.) « Soil Conservation and Productivity », Universidad Central de Venezuela. Maracay, pp. 798–809.

Laverdière, M.R. (1994) « Gestion des sols, module 4- Élément du plan de conservation des sols; module 8- Pratiques agronomiques de conservation de sols; Biologie du sol, amendements organiques et autres pratiques agronomiques de conservation du sol », Département de génie rural, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, 166 p.

Lecce, S.A, Pease, P.P., Gares, P.A., et Wang, J. (2006) « Seasonal controls on sediment delivery in a small coastal plain watershed, North Carolina, USA », *Geomorphology*, 73: 246-260.

Lentz, R.D, Dowdy, R.H., et Rust, R.H. (1993) « Soil property patterns and topographic parameters associated with ephemeral gully erosion », *Journal of Soil and Water Conservation*, 48 : 354-361.

Leonard, R.L., Kaplan, L.A., Helder, J.F., Coats, R.N., et Goldman, C.R. (1979) « Nutrient transport in surface runoff from a subalpine watershed, Lake Tahoe Basin, California », *Ecological Monographs*, 49 : 281-310.

Liggitt, B., et Fitcham, R.J. (1989) « Gully erosion- the neglected dimension in soil-erosion research » *South African Journal of Sciences*, 85 : 18-20.

Li, Y., Zhu, X.M., et Tian, J.Y. (1991) « Effectiveness of plant roots to increase the anti-scourability of soil on the Loess Plateau » *Chinese Science Bulletin*, 36 : 2077-2082.

Ludwig, B., Boiffin, J., Chadoeuf, J., et Auzet, A.V. (1995) « Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments », *Catena*, 25 : 227-252.

Mathys, N., Klotz, S., Esteves, S., et Lapetite, J.M. (2005) « Runoff and erosion in the black Marls of the French Alps, observations and measurements at the plot scale », *Catena*, 633 : 261-281.



McKergow, L.A., Weaver, D.M., Prosser, I.P., Grayson, R.B., et Reed, A.E.G. (2003) « Before and after riparian management: sediment and nutrient exports from a small agricultural catchment, Western Australia », *Journal of Hydrology*, 270 : 253-272.

Millward, A.A., et Mersey, J.E. (1999) « Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed », *Catena*, 38 : 109-130.

Morgan, R.P.C. (1995) « Soil erosion and conservation », 2nd Ed, Longman, London, 304 p.

Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M., et Govers, G. (2002) « Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands », *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 : 1267-1283.

Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Deckers, J., Mitiku, H., et Lang, A. (2004) « Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean highlands—a state of the art », *Earth Science Reviews*, 64 : 273– 320.

Ongley, E.D., Bynoe, M.C., et Percival, J.B. (1981) « Physical and geochemical characteristics of suspended solids, Wilton Creek, Ontario », *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18 : 1365-1379.

Osterkamp, W.R., et Toy, T.J. (1997) « Geomorphic considerations for erosion prediction », *Environmental Geology*, 29 : 152-157.

Ouvry, J.F. (1989) « Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré. Expérience du Pays de Caux (France) », *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 251 : 157– 170.

Owens, L.B., Edwards, W.M., et Van Keuren, R.W. (1996) « Sediment losses from a pastured watershed before and after stream fencing », *Journal of Soil and Water Conservation*, 51 : 90-94.

Oygarden, L. (2003) « Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway », *Catena*, 50 : 217-242.

Poesen, J., et Govers, G. (1990) « Gully erosion in the loam belt of Belgium: typology and control measures », *In* Boardman, J., Foster, D.L., et Dearing, J.A. (Ed.) « Soil Erosion on Agricultural Land », Wiley, Chichester, pp. 513–530.

Poesen, J., Vandaele, K., et Van Wesemael, B. (1996) « Contribution of gully erosion to sediment production in cultivated lands and rangelands », *International Association of Hydrological Sciences Publications*, 236: 251-266.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., et Valentin, C. (2003) « Gully erosion and environmental change: importance and research needs », *Catena*, 50 : 91-133.

Québec, Direction de la cartographie topographique, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP) (1998-99) « Orthophotographies, noir et blanc », [fichier numérique] 1:40 000.

Québec, Direction de la cartographie topographique, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP) (2003) « Base de données topographiques du Québec (BDTQ) » [fichiers numériques] 1 :20 000.

Rejman, J., et Brodowski, R. (2005) « Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil », *Earth Surface Processes and Landforms*, 30 : 231-239.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., et Yoder, D.C. (1997) « Predicting soil erosion by water : a guide to conservation planning with the RUSLE », *Handbook*, vol. 703, United States Department of Agriculture, Washington, DC, 404 p.

Rheinhardt, R.D., Rheinhardt, M.C., Brinson, M.M., et Fraser, K.E. (1999) « Application of reference data for assessing and restoring headwater ecosystems », *Restoration Ecology*, 7 : 241-251.

Sarma, J.N. (1986) « Sediment transport in the Burhi Dihing River, India », *In* Hadley, R.F. (Ed.) « Drainage basin sediment delivery », International Association of Hydrological Sciences Publications 159, pp. 199–215.

Service météorologique du Canada (2007) « Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000 » Environnement Canada, Uniform Resource Locator [www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate\\_normals](http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals)

Souchère V., King, D., Daroussin, J., Papy, F., et Capillon, A. (1998) « Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments », *Journal of hydrology*, 206 : 256-267.

Spomer, R.G., et Hjelmfeldt, A.T. (1983) « Snowmelt runoff and erosion on Iowa loess soils », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 26 : 1109– 1116.

Steege, A., Govers, G., Nachtergaele, J., Takken, I., Beuselinck, L., et Poesen, J. (2000) « Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt in central Belgium », *Geomorphology*, 33 : 25–36.

Skvortsov, A.F. (1959) « River suspensions and soils », *Soviet soil Sciences*, 4: 409-416.

Stoodard, J.L., Larsen, D.P., Hawkins, C.P., Johnson, R.K., et Norris, R.H. (2006) « Setting expectations for the ecological condition of streams : the concept of reference condition », *Ecological application*, 16 : 1267-1276.

Stone, R.P. (1996) « La maîtrise de l'érosion du sol », Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculture et Affaires Rurales, Guelph, 7 p.

Stone, R.P. (2000) « Équation universelle des pertes en terre (USLE) », Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculture et Affaires Rurales, Guelph. 9 p.

Strahler, A.N. (1952) « Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography », Geological Society of America Bulletin, 63 : 1117-1141.

Swiechowicz, J. (2002) « The influence of plant cover and land use on slope-channel decoupling in a foothills catchment : a case study from the Carpathian foothill, southern Polan », Earth Surface Processes and Landforms, 27 : 463-479.

Syversen, N. (2005) « Effect and design of bufer zones in the Nordic climate : The influence of width, amount of surface runoff, seasonal variation and vegetation type on retention efficiency for nutrient and particle runoff », Ecological Engineering, 24 : 484-490.

United States Department of Agriculture (2003) « User's Guide Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2, RUSLE2 », United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC, 77 p.

Valentin, C., Poesen, J., et Li, Y. (2005) « Gully erosion : Impacts, factors and control », Catena, 63 : 132-153.

Van Dijk, P.M., et Kwaad, F.J.P.M. (1996) « Runoff generation and soil erosion in small agricultural catchments with loess-derived soils », Hydrological Processes, 10 : 1049-1059.

Vandaele, K., et Poesen, J. (1995) « Spatial and Temporal Patterns of Soil-Erosion Rates in an Agricultural Catchment, Central Belgium », Catena, 25 : 213-226.

Vanwalleghem, T., Poesen, J., Nachtergaele, J., et Verstraeten, G. (2005) « Characteristics controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils », Geomorphology, 69 : 76-91.

Verstraeten, G. et Poesen, J. (2001) « Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate », Geomorphology, 40 : 123-144.

Wade, R.J., et Kirkbride, M.P. (1998) « Snowmelt-generated runoff and soil erosion in Fife, Scotland », *Earth Surface Processes and Landforms*, 23 :123-132.

Walling, D.E. (1974) « Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization », *In* Gregory, K.J., et Walling, D.E. (Ed.) « Fluvial processes in instrumented watersheds », *Institute of British geographers Special Publication 6*, pp. 169–192.

Walling, D.E., et Webb, B.W. (1982) « Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. Recent Developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield », *International Association of Hydrological Sciences Publications*, 137: 327-337.

Wallin, M., Wiederholm, T., et Johnson, R.K. (2003) « Final guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters », *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive*, 93 p.

Wasson, R.J., Caitcheon, G., Murray, A.S., McCulloch, M., et Quade, J. (2002) « Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of Lake Argyle, northwestern Australia », *Environmental Management*, 29 : 634– 646.

Wischmeier, W.H., et Smith, D.D. (1978) « Predicting rainfall erosion loss- a guide to conservation », *Agriculture Handbook*, vol. 537, United States Department of Agriculture, Washington, DC, 58 p.

Wood, P.A. (1977) « Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England », *Sedimentology*, 24 : 437-445.

Yang, G., Chen, Z., Yu, F., Wang, Z., Zhao, Y., et Wang, Z. (2007) « Sediment rating parameters and their implications: Yangtze river, China », *Geomorphology*, 85 : 166-175.

## **ANNEXE A**

### **CONTRIBUTION DU RAVINEMENT AUX PERTES TOTALES EN SEDIMENT PAR L'EROSION HYDRIQUE**

Location	SLgully (ton ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	SLgully (%)	Source
Belgium, Central	22.3	10	Govers and Poesen (1988)
France, North	n.a.	10–45	Ludwig et al. (1992)
Germany, South	n.a.	12–29	Auerswald (1998)
USA, New York	11.3	18	USDA-NRCS (1997)
USA, Wisconsin	0.5–2.0	18–36	Irribble (1999)
USA, Iowa	2–18.2	19–35	Lallen (1985)
USA, Iowa	8.7	19	Bradford and Piest (1980)
France, Normandy	n.a.	21–56	Cerdan et al. (2003)
USA, Michigan	2.7	21	USDA-NRCS (1997)
USA, Iowa	6.7	24	USDA-NRCS (1997)
USA, Louisiana	13.5	25	USDA-NRCS (1997)
Spain, North–West	1.5	26	Valcarlos et al. (2003, this volume)
USA, Kansas	17.9	27	USDA-NRCS (1997)
USA, Georgia	12	28	Thomas et al. (1986)
USA, Rhode Island	8.3	29	USDA-NRCS (1997)
USA, Mississippi	16.8	30	USDA-NRCS (1997)
USA, Maine	11.5	31	USDA-NRCS (1997)
USA, North Dakota	8.0	32	USDA-NRCS (1997)
Ethiopia, Tigray	4.7–12.1	32–55	Nyssen (2001)
USA, Wisconsin	9.4	33	USDA-NRCS (1997)
Germany, South–West	n.a.	36	Baade (1994)
Romania	n.a.	37	Nedelea (2001)
USA, Alabama	20.8	37	USDA-NRCS (1997)
China, North	25–42	40–70	Li et al. (2000)
USA, Pennsylvania	4.0	41	USDA-NRCS (1997)
USA, Illinois	11.6	42	USDA-NRCS (1997)
USA, Maryland	9.0	43	USDA-NRCS (1997)
USA, New Jersey	11.6	44	USDA-NRCS (1997)
Belgium, Central	3.6	44	Poesen et al. (1996b)
USA, Iowa	11.9	45	Spomer and Hjelmfelt (1986)
France, North	n.a.	46–55	Anzet et al. (1995)
Portugal, Bragança	16.1	47	Vandekerckhove et al. (1998)
USA, Virginia	28.7	50	USDA-NRCS (1997)
Australia	n.a.	50	Wasson et al. (1996)
USA, Alabama	19.7–35.9	50–60	Lallen (1985)
Spain, Guadalajara	37.6	51	Poesen et al. (2002)
Kenya, Baringo	3.4	52	Oostwoud Wijdenes and Bryan (1994)
Norway, Leda basin	12.7	53	Bogen et al. (1994)
Spain, Catalonia	n.a.	58	Martinez-Casasnovas et al. (2002)
USA, Vermont	13.7	58	USDA-NRCS (1997)
Argentina, Northeast Patagonia	n.a.	58	Coronato and Del Valle (1993)
Spain	1.2	59	Oostwoud Wijdenes et al. (2000)
USA, Mississippi	7.7	60	Grisinger and Murphey (1989)
Australia, New South Wales	0.1	60	Crouch (1990)
Belgium, Central	n.a.	60	Quine et al. (1994)
USA, Arizona	1.3–3.9	60–81	Osborn and Samanton (1989)
USA, South California	36.8	71	Irribble (1997)
USA, Delaware	5.6	71	USDA-NRCS (1997)
USA, Washington	4.2	73	USDA-NRCS (1997)
Spain	61.9	74	Casali et al. (2000)
Niger, Ader Douti Massif	22	75	Heusch (1980)
Australia, Northwest	n.a.	80	Wasson et al. (2002)
Portugal, Alentejo	3.2	80	Poesen et al. (1996b)
Spain, Almería	9.7	82	Poesen et al. (1996b)
China, Guangdong	n.a.	87	ditzenzo and Luk (1997)
Lesotho	15	94	Rydgren (1990)

Source: Données compilées par Poesen et al. (2003)

Location	Ratio ephemeral/ sheet-rill erosion	Remarks
Athens, GA (USA)	0.38	Thomas and Welch (1988). Sandy loam soils, conventional tilled soybeans and untilled fallow during winter, 3 ha, slopes 5–6%.
Athens, GA (USA)	0.43	Thomas et al. (1986). Sandy loam soils, double-cropped soybeans and winter wheat, slopes 6%, 2–8 ha.
Pottawatomie County, IA (USA)	0.25	SCS unpublished survey data. Loess soil, slopes 3–11%, 8 ha.
Boone County, IA (USA)	0.24	SCS unpublished survey data. Loess soil, slopes 3–11%, 8 ha.
Wiregrass, AL (USA)	1.47	SCS data (Miller, 1982). Soil from hydrologic group A.
Wiregrass, AL (USA)	1.00	SCS data (Miller, 1982). Soil from hydrologic group B.
<i>For these data the sheet-rill erosion rate is estimated using the USLE. Ephemeral gully erosion is estimated by field measurements and aerial photographs. (After Laflen et al., 1986.)</i>		
Treynor, IA (USA)	0.53	Spomer and Hjelmfelt (1985). Conservation tillage, continuous corn on contour. Loess soil, steep slopes, 43 ha (1972–1983).
Treynor, IA (USA)	0.29	Spomer and Hjelmfelt (1985). Conventional tillage, continuous corn on contour. Loess soils, steep slopes, 24 ha (1964–1983).
<i>For these data the sheet-rill erosion rate is estimated using the average sediment yield and a delivery ratio of 0.53. Ephemeral gully erosion is estimated by field measurements and aerial photographs. (After Laflen et al., 1986.)</i>		
Goodwin Creek, MS (USA)	1.5	Grissinger and Murphey (1989). Loess soil, conventional tilled, soybeans, 1.9 ha (1985–1987).
<i>For these data the sheet-rill erosion rate is estimated using the sediment yield at the outlet of the catchment. Ephemeral gully development was studied by field surveys and aerial photographs.</i>		
Northern France <sup>a</sup>	0.85	Auzet, personal communication, 1988/89. Several catchments, loess soil, slopes 3–11%. Conventional tillage, winter and summer crops, 34 ha (mean).
Northern France <sup>a</sup>	0.80	Auzet, personal communication, 1989/90. Several catchments, loess soil, slope 3–11%. Conventional tillage; winter and summer crops, 34 ha (mean).
Central Belgium	0.9–1.7	This study, 1989–1992. Conventional tillage, 25 ha.
<i>For all these data rill and ephemeral gully erosion is calculated by using volumetric measurements of erosion features.</i>		

<sup>a</sup> Erosion during winter.

Source: Données compilées par Vandaele et Poesen (1995)



**ANNEXE B**

**MATRICE DE CORRÉLATION ENTRE LES VARIABLES  
INDÉPENDANTES**

••

-

	A	LH	DDH	STR	G2mm	G1mm	G500µm	G250µm	G90µm
A	1,00								
LH	0,92	1,00							
DDH	-0,19	0,16	1,00						
STR	0,93	0,99	0,05	1,00					
G2mm	-0,16	-0,28	-0,25	-0,32	1,00				
G1mm	-0,38	-0,53	-0,42	-0,53	0,91	1,00			
G500µm	-0,42	-0,59	-0,65	-0,51	0,40	0,73	1,00		
G250µm	-0,11	-0,10	-0,30	0,00	-0,49	-0,14	0,55	1,00	
G90µm	0,47	0,66	0,62	0,61	-0,70	-0,92	-0,91	-0,18	1,00
G44µm	0,09	0,14	0,44	0,07	-0,14	-0,44	-0,83	-0,78	0,59
GM44µm	-0,05	-0,17	0,00	-0,23	0,56	0,29	-0,31	-0,92	-0,08
PML	0,50	0,28	-0,81	0,42	-0,21	-0,07	0,35	0,52	-0,17
PRO0a0.5	-0,74	-0,49	0,78	-0,58	-0,03	-0,04	-0,23	-0,26	0,14
PRO0.5a0.8	0,79	0,62	-0,39	0,60	0,42	0,25	0,02	-0,19	-0,08
PRO+0.8	-0,06	-0,18	-0,53	-0,03	-0,54	-0,29	0,29	0,62	-0,09
LML	0,16	-0,12	-0,77	-0,01	0,12	0,14	0,21	-0,06	-0,32
LAR0a2	-0,29	0,07	0,92	-0,05	0,00	-0,10	-0,34	-0,19	0,32
LAR2a4	0,30	-0,06	-0,95	0,04	0,06	0,20	0,47	0,28	-0,40
LAR+4	0,10	-0,04	-0,37	0,05	-0,18	-0,23	-0,19	-0,19	0,08
PMT	-0,34	-0,40	0,13	-0,48	-0,05	0,08	0,16	0,11	-0,07
PTA0a10	0,34	0,49	0,08	0,57	-0,28	-0,40	-0,35	0,01	0,35
PTA10a20	-0,60	-0,56	0,24	-0,65	0,51	0,61	0,42	-0,06	-0,48
PTA+20	0,62	0,43	-0,43	0,50	-0,53	-0,58	-0,33	0,07	0,42
LMT	0,08	0,06	-0,18	0,15	-0,06	-0,17	-0,25	-0,27	0,09
LTA0a5	-0,13	-0,21	-0,21	-0,20	0,67	0,51	0,03	-0,64	-0,39
LTA5a15	-0,01	0,08	0,31	0,03	-0,52	-0,37	-0,01	0,52	0,32
LTA+15	0,46	0,47	-0,15	0,56	-0,82	-0,67	-0,06	0,74	0,44
RAVIN	0,29	-0,02	-0,77	0,09	-0,35	-0,19	0,23	0,38	-0,08
DS	0,30	-0,05	-0,82	0,01	-0,05	0,10	0,40	0,31	-0,29
LDS	0,68	0,64	-0,37	0,72	-0,33	-0,24	0,17	0,63	0,12
AC	0,55	0,46	-0,32	0,57	-0,68	-0,69	-0,31	0,27	0,47
AF	-0,50	-0,43	0,30	-0,53	0,59	0,63	0,33	-0,17	-0,43
CM	0,10	-0,21	-0,82	-0,16	0,36	0,57	0,76	0,37	-0,68
CC	-0,17	0,20	0,97	0,09	-0,20	-0,33	-0,50	-0,16	0,52
CF	0,20	-0,02	-0,55	0,08	-0,26	-0,26	-0,10	-0,06	0,06
CLM	0,03	-0,26	-0,82	-0,19	0,27	0,53	0,82	0,51	-0,69
CLC	-0,29	0,07	0,98	-0,04	-0,15	-0,28	-0,50	-0,23	0,48
CLF	0,16	-0,07	-0,60	0,05	-0,57	-0,38	0,13	0,47	0,06
CLFOR	0,23	0,35	0,38	0,25	0,65	0,35	-0,27	-0,66	0,01
TDS_C	-0,13	0,08	0,56	-0,04	0,29	0,25	0,02	-0,05	-0,01
TDS_D	0,17	-0,03	-0,50	0,07	-0,19	-0,23	-0,14	-0,15	0,05
RBR3	-0,25	-0,02	0,64	-0,11	-0,28	-0,19	-0,05	0,31	0,25

	G44 $\mu$ m	GM44 $\mu$ m	PML	PRO0a0,5	PRO0,5a0,8	PRO+0,8	LML	LAR0a2	LAR2a4
G44 $\mu$ m	1,00								
GM44 $\mu$ m	0,72	1,00							
PML	-0,42	-0,34	1,00						
PRO0a0,5	0,36	0,17	-0,90	1,00					
PRO0,5a0,8	-0,22	0,09	0,38	-0,74	1,00				
PRO+0,8	-0,19	-0,36	0,72	-0,36	-0,32	1,00			
LML	0,13	0,38	0,68	-0,56	0,10	0,64	1,00		
LAR0a2	0,12	-0,12	-0,82	0,75	-0,28	-0,65	-0,88	1,00	
LAR2a4	-0,30	0,00	0,82	-0,80	0,39	0,56	0,74	-0,97	1,00
LAR+4	0,49	0,42	0,44	-0,25	-0,22	0,64	0,87	-0,63	0,40
PMT	-0,11	-0,11	-0,41	0,34	-0,13	-0,29	-0,49	0,16	0,01
PTA0a10	0,19	-0,07	0,35	-0,21	-0,05	0,36	0,33	-0,02	-0,16
PTA10a20	-0,31	0,02	-0,65	0,54	-0,10	-0,60	-0,60	0,49	-0,33
PTA+20	0,31	0,03	0,68	-0,63	0,19	0,59	0,63	-0,72	0,63
LMT	0,46	0,41	0,32	-0,14	-0,21	0,48	0,73	-0,36	0,12
LTA0a5	0,36	0,78	-0,05	0,01	0,06	-0,10	0,57	-0,18	0,04
LTA5a15	-0,32	-0,68	-0,17	0,17	-0,09	-0,11	-0,71	0,33	-0,16
LTA+15	-0,32	-0,79	0,62	-0,47	0,05	0,58	0,00	-0,26	0,29
RAVIN	-0,12	-0,12	0,79	-0,66	0,13	0,74	0,69	-0,92	0,91
DS	-0,30	-0,09	0,67	-0,70	0,39	0,42	0,51	-0,85	0,94
LDS	-0,60	-0,71	0,75	-0,77	0,54	0,31	0,04	-0,29	0,39
AC	0,20	-0,20	0,72	-0,56	0,03	0,73	0,56	-0,58	0,46
AF	-0,27	0,08	-0,69	0,51	0,02	-0,73	-0,64	0,57	-0,41
CM	-0,67	-0,17	0,53	-0,62	0,51	0,15	0,29	-0,62	0,79
CC	0,22	-0,17	-0,76	0,71	-0,31	-0,56	-0,85	0,97	-0,97
CF	0,37	0,32	0,60	-0,43	-0,09	0,72	0,90	-0,81	0,64
CLM	-0,75	-0,31	0,57	-0,59	0,40	0,26	0,27	-0,61	0,78
CLC	0,29	-0,06	-0,85	0,81	-0,39	-0,58	-0,84	0,97	-0,98
CLF	-0,03	-0,22	0,72	-0,49	-0,15	0,87	0,64	-0,81	0,75
CLFOR	0,18	0,43	-0,46	0,13	0,49	-0,85	-0,33	0,52	-0,50
TDS_C	-0,29	-0,23	-0,63	0,41	0,17	-0,80	-0,90	0,80	-0,63
TDS_D	0,44	0,40	0,54	-0,37	-0,11	0,67	0,91	-0,76	0,56
RBR3	-0,26	-0,55	-0,55	0,52	-0,22	-0,41	-0,95	0,73	-0,58

	LAR+4	PMT	PTA0a10	PTA10a20	PTA+20	LMT	LTA0a5	LTA5a15	LTA+15
LAR+4	1,00								
PMT	-0,57	1,00							
PTA0a10	0,54	-0,94	1,00						
PTA10a20	-0,76	0,69	-0,77	1,00					
PTA+20	0,68	-0,25	0,32	-0,85	1,00				
LMT	0,91	-0,82	0,78	-0,73	0,44	1,00	..		
LTA0a5	0,54	-0,57	0,32	-0,12	-0,10	0,68	1,00		
LTA5a15	-0,68	0,73	-0,51	0,35	-0,10	-0,82	-0,97	1,00	
LTA+15	0,04	-0,06	0,28	-0,54	0,58	-0,08	-0,73	0,52	1,00
RAVIN	0,52	0,06	-0,07	-0,50	0,82	0,18	-0,18	0,02	0,53
DS	0,18	0,31	-0,41	-0,16	0,59	-0,17	-0,23	0,15	0,35
LDS	-0,15	-0,26	0,30	-0,43	0,38	-0,15	-0,48	0,29	0,80
AC	0,69	-0,45	0,58	-0,94	0,93	0,55	-0,14	-0,10	0,72
AF	-0,79	0,59	-0,69	0,98	-0,89	-0,70	-0,04	0,28	-0,61
CM	-0,19	0,34	-0,54	0,25	0,08	-0,41	-0,13	0,12	0,09
CC	-0,52	0,10	0,11	0,31	-0,55	-0,27	-0,26	0,37	-0,10
CF	0,95	-0,38	0,35	-0,75	0,83	0,74	0,34	-0,50	0,20
CLM	-0,20	0,33	-0,50	0,24	0,07	-0,41	-0,20	0,18	0,19
CLC	-0,50	0,18	0,01	0,38	-0,59	-0,27	-0,21	0,34	-0,20
CLF	0,61	0,00	0,08	-0,59	0,82	0,29	-0,24	0,06	0,62
CLFOR	-0,35	-0,25	0,10	0,28	-0,50	-0,06	0,44	-0,32	-0,60
TDS_C	-0,95	0,41	-0,39	0,75	-0,79	-0,76	-0,32	0,50	-0,24
TDS_D	0,98	-0,46	0,42	-0,75	0,78	0,82	0,45	-0,60	0,11
RBR3	-0,85	0,64	-0,44	0,61	-0,53	-0,81	-0,75	0,87	0,18

	RAVIN	DS	LDS	AC	AF	CM	CC	CF	CLM
RAVIN	1,00								
DS	0,90	1,00							
LDS	0,37	0,38	1,00						
AC	0,70	0,37	0,50	1,00					
AF	-0,62	-0,26	-0,40	-0,98	1,00				
CM	0,55	0,83	0,38	-0,10	0,18	1,00			
CC	-0,84	-0,85	-0,22	-0,39	0,38	-0,74	1,00		
CF	0,76	0,48	0,00	0,77	-0,82	0,06	-0,70	1,00	
CLM	0,57	0,81	0,43	-0,06	0,15	0,99	-0,71	0,05	1,00
CLC	-0,84	-0,85	-0,37	-0,46	0,45	-0,74	0,99	-0,68	-0,73
CLF	0,95	0,72	0,31	0,79	-0,73	0,32	-0,69	0,80	0,37
CLFOR	-0,75	-0,54	-0,16	-0,54	0,46	-0,24	0,44	-0,53	-0,34
TDS_C	-0,76	-0,45	-0,03	-0,77	0,83	-0,05	0,70	-0,99	-0,06
TDS_D	0,67	0,37	-0,07	0,73	-0,80	-0,03	-0,65	0,99	-0,05
RBR3	-0,47	-0,31	0,02	-0,47	0,58	-0,15	0,72	-0,81	-0,09

	CLC	CLF	CLFOR	TDS_C	TDS_D	RBR3
CLC	1,00					
CLF	-0,69	1,00				
CLFOR	0,41	-0,89	1,00			
TDS_C	0,68	-0,82	0,59	1,00		
TDS_D	-0,63	0,72	-0,44	-0,98	1,00	
RBR3	0,71	-0,40	0,03	0,80	-0,86	1,00